Richard P. Feynman

laureat al Premiului Nobel

fun,da'mental

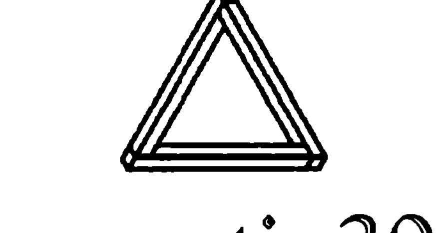
QED
strania teorie despre lumină și materie

PERGAMENT

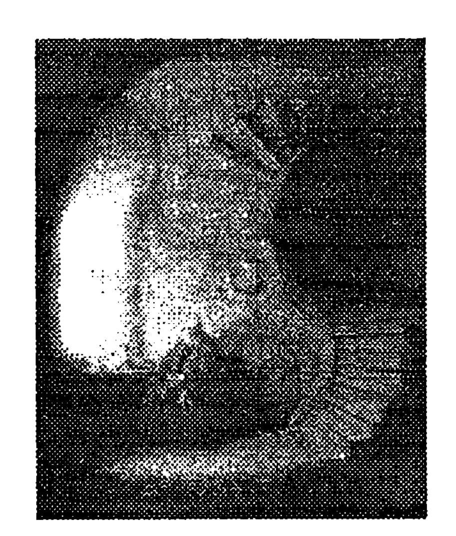
Richard P. Feynman

QED
strania teorie despre lumină și materie

traducere de Valentin Stoica



București, 2007



fun,da'mental

Coperta şi tehnoredactarea: Valentin Stoica
Ilustraţia copertei: Rembrandt Harmenszoon van Rijn,
Filosof meditând (detaliu),
ulei pe lemn, circa 1632, 28 × 34 cm,
Muzeul Luvru, Paris
Redactor: Ioana Stoica

Richard P. Feynman, *QED: the strange theory of light and matter*
©2007 by Richard P. Feynman

©2007 Editura Pergament
Toate drepturile prezentei ediţii sunt rezervate Editurii Pergament. Reproducerea şi transmiterea acestei cărţi în parte ori în întregime, de orice natură şi prin orice fel de mijloace, fie ele electronice sau mecanice, inclusiv prin fotocopiere, prin înregistrare ori prin sisteme de stocare şi prelucrare a datelor, precum şi vânzarea şi/sau distribuţia, pot fi făcute numai cu acordul scris al editurii.

Descrierea CIP a Bibliotecii Naţionale a României
FEYNMAN, RICHARD P.
QED : strania teorie despre lumină şi materie /
Richard P. Feynman. - Bucureşti : Pergament, 2007
ISBN 978-973-85481-2-1

530.145
537.8

S.C. PERGAMENT S.R.L.
Înregistrată la Registrul Comerţului cu numărul J40/5359/30.05.2001
Sediul: Bucureşti, sector 1
blvd. Ion Mihalache, nr. 337
bl. 14, sc. A, et. 2, ap. 12
Telefon: (004) 021 665 6050 / 0722 278 883
e-mail: valentin4143@gmail.com

Richard Phillips Feynman a fost unul dintre cei mai străluciți fizicieni teoreticieni şi unul din gânditorii cei mai originali ai secolului care s-a încheiat. Născut în Far Rockaway, statul New York, pe data de 11 mai 1918, el a studiat la Massachusetts Institute of Technology, unde şi-a dat examenul de licență în științe în anul 1939. A continuat apoi studiile la Princeton, unde şi-a susținut lucrarea de doctorat în 1942. În timpul celui de-al Doilea Război Mondial, a lucrat la Los Alamos Scientific Laboratory. A devenit după aceea profesor de fizică teoretică la Cornell University, unde a lucrat alături de Hans Bethe.

Profesorul Feynman a reconstruit literalmente din temelii teoria electrodinamicii cuantice, fapt pentru care i s-a decernat Premiul Nobel în anul 1965. Regulile sale de calcul simplificate au devenit unelte standard de analiză teoretică atât în domeniul electrodinamicii cuantice, cât şi în cel al fizicii energiilor înalte. În anul 1950 s-a detaşat ca profesor la California Institute of Technology, unde ulterior a şi fost titularizat. Din 1959, a deținut catedra Richard Chace Tolman de fizică teoretică. A dovedit o abilitate extraordinară în a-şi împărtăşi cunoştințele de fizică publicului de orice nivel, şi a fost un binecunoscut şi îndrăgit conferențiar.

Richard P. Feynman s-a stins din viață pe data de 15 februarie 1988, în urma unei îndelungate suferințe. Profesorul Freeman Dyson, de la Institute for Advanced Study din Princeton, l-a caracterizat drept „cea mai originală minte a generației sale", iar necrologul publicat în New York Times l-a descris ca fiind „probabil fizicianul teoretician cel mai strălucit, influent şi iconoclast al generației postbelice".

CUPRINS

CUVÂNT ÎNAINTE

Prelegerile Memorialul Alex G. Mautner au fost gândite în amintirea soției mele, Alix, care a murit în 1982. Deşi cariera ei s-a desfăşurat în domeniul literaturii engleze, Alix a nutrit un îndelungat şi neclintit interes pentru multe domenii ale ştiinței. Astfel, mi s-a părut potrivit să înființez o fundație cu numele ei, care să sprijine o serie anuală de prelegeri având ca obiectiv comunicarea, către un public inteligent şi interesat, a spiritului şi realizărilor ştiinței.

Sunt încântat că Richard Feynman a fost de acord să susțină prima serie a acestor prelegeri. Prietenia noastră merge înapoi în timp până în urmă cu cincizeci şi cinci de ani, pe vremea când copilăream în Far Rockaway, New York. Richard a cunoscut-o pe Alix vreme de aproximativ douăzeci şi doi de ani, iar ea l-a îndemnat îndelung să realizeze o prezentare a fizicii particulelor mici, care să poată fi înțeleasă de ea şi de alții fără pregătire de specialitate.

Pe lângă aceasta, aş dori să îmi exprim stima față de cei care au contribuit la Fondul Alix G. Mautner, şi care astfel au ajutat la a face posibile aceste prelegeri.

Leonard Mautner
Los Angeles, California
Mai, 1983

PREFAȚĂ

Richard Feynman este legendar în lumea fizicii pentru modul lui de a privi lumea: neluând nimic de bun, și explicându-și totdeauna sieși lucrurile, el atinge adesea o nouă și profundă înțelegere a comportării naturii - cu o manieră proaspătă și elegantă de a o descrie.

El este de asemenea cunoscut pentru entuziasmul cu care le explică studenților fizica. Contrar faptului că a refuzat nenumărate oferte de a ține discursuri la prestigioase societăți și organizații, Feynman se dă în vânt după situațiile în care un student vine la el în birou și îl roagă să participe la întrunirile organizate de către clubul de fizică al colegiului.

Această carte reprezintă o întreprindere care, din câte știu eu, nu a mai fost încercată niciodată. Este o explicare simplă, directă, a unui subiect cât se poate de dificil - teoria electrodinamicii cuantice - pentru un public fără pregătire matematică. Ea este gândită să ofere cititorului interesat o idee asupra genului de raționament la care au recurs fizicienii pentru a explica modul în care se comportă natura.

Dacă intenționați să studiați fizica (sau o faceți deja), nu există nimic în această carte care să trebuiască a fi „dezvățat": este o descriere completă, exactă în cel mai mic detaliu, a unui cadru conceptual pe care pot fi grefate fără nicio modificare diferite noțiuni mai avansate. Pentru cei dintre dumneavoastră care deja au studiat fizica, ea este o revelație cu privire la ceea ce făceați *propriu-zis* atunci când efectuați toate acele calcule complicate!

În copilărie, Richard Feynman a fost impulsionat să studieze analiza matematică de către o carte care începea astfel: „Ceea ce poate face un neghiob, poate face și un altul." El ar dori să dedice această carte

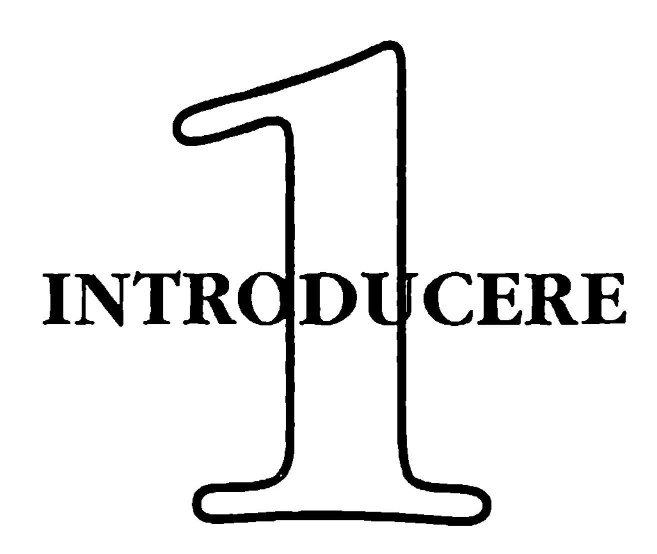
cititorilor săi, cu nişte cuvinte asemănătoare: „Ceea ce poate înțelege un neghiob, poate înțelege şi un altul.“

Ralph Leighton
Pasadena, California
Februarie, 1985

MULȚUMIRI

Această carte se dorește a fi o prelungire a prelegerilor pe tema electrodinamicii cuantice, pe care le-am susținut la UCLA, transcrise și editate de bunul meu prieten, Ralph Leighton. De fapt, manuscrisul a suferit modificări considerabile. Experiența domnului Leighton în predare și scriitură a fost de real folos în această încercare de a prezenta unui public larg un domeniu central al fizicii.

Multe expozițiuni de „popularizare“ a științei își câștigă aparenta simplitate doar descriind ceva diferit, ceva considerabil distorsionat față de ceea ce pretind a descrie. Respectul nostru față de subiect nu ne-a permis să facem acesta. De-a lungul multor ore de discuții, am încercat să dobândim maximum de claritate și simplitate, fără a compromite adevărul prin distorsionare.



INTRODUCERE

Alix Mautner a fost foarte curioasă în ceea ce priveşte fizica, şi mi-a cerut adesea să-i explic unele lucruri. Aş fi făcut-o cu brio, aşa cum o fac atunci când un grup de studenţi de la Caltech se prezintă la mine la ora de consultaţii de joia, dar, în final, aş fi dat chix atunci când aş fi ajuns la partea pe care eu o consider cea mai interesantă: ne-am fi împotmolit în ideile nebuneşti ale mecanicii cuantice. I-am spus că n-aş putea să-i explic aceste idei într-o oră sau într-o seară - mi-ar lua mult timp - dar i-am promis că într-o bună zi voi pregăti o serie de prelegeri pe această temă.

Am pregătit câteva prelegeri şi m-am dus în Noua Zeelandă, să le încerc - cum Noua Zeelandă este foarte departe, dacă ele nu ar fi avut succes, lucrurile ar fi fost în regulă! Ei bine, cei din Noua Zeelandă au considerat că ele sunt OK, deci bănuiesc că aşa şi sunt - cel puţin pentru Noua Zeelandă! Aşa încât, iată prelegerile pe care le-am pregătit pentru Alix, însă, din nefericire, nu i le pot prezenta acum direct.

Doresc să vă vorbesc despre o parte a fizicii care este *cunoscută*, nu despre una necunoscută. Lumea întreabă mereu despre ultimele cuceriri în privinţa unificării cutărei teorii cu cutare teorie, şi nu ne acordă şansa să le spunem câte ceva despre teoriile pe care le ştim binişor. Ei vor întotdeauna să afle lucruri pe care noi nu le ştim. Aşa încât, în loc să vă zăpăcesc cu o grămadă de teorii nepuse la punct şi analizate doar parţial, aş dori să vă vorbesc despre un subiect care a fost foarte amănunţit analizat. Iubesc acest domeniu al fizicii şi consider că este unul încântător: el se numeşte electrodinamică cuantică, sau, pe scurt, QED [*quantum electrodynamics*, în engleză, în original (n.t.)].

Scopul meu principal pe parcursul acestor prelegeri, este de a descrie, cât mai exact cu putință, strania teorie despre lumină și materie - sau, mai precis, interacțiunea luminii cu electronii. Îmi va lua mult timp să vă explic toate lucrurile pe care intenționez să le prezint. Totuși, este vorba de patru prelegeri, așa încât n-am să mă grăbesc, și o s-o scoatem la capăt cu bine.

Trecutul fizicii este cunoscut ca o istorie a sintetizării multor fenomene într-un număr restrâns de teorii. De exemplu, în zilele de început, existau fenomene mecanice și fenomene termice; fenomene acustice, optice și gravitaționale. Dar, după ce Sir Isaac Newton a explicat legile mișcării, s-a descoperit curând că unele din aceste chestiuni aparent deosebite erau aspecte ale aceluiași lucru. De pildă, fenomenele acustice puteau fi complet înțelese ca mișcare a atomilor aerului. Deci sunetul nu a mai fost considerat drept ceva suplimentar mecanicii. S-a descoperit, de asemenea, că și fenomenele termice pot fi ușor înțelese pornind de la legile mișcării. Astfel, porțiuni mari ale teoriei fizice au fost sintetizate într-o teorie simplificată. Pe de altă parte, teoria gravitației nu poate fi înțeleasă pornind de la legile mișcării, și chiar și astăzi ea stă izolată de celelalte teorii. Până în momentul de față, gravitația nu poate fi înțeleasă în termeni de alte fenomene.

După sinteza fenomenelor mecanice, acustice și termice, a urmat descoperirea unui număr de fenomene pe care le numim electrice și magnetice. În 1873, acestea au fost sintetizate într-o singură teorie, dimpreună cu fenomenele optice, de către James Clerk Maxwell, care a avansat ipoteza că lumina este o undă electromagnetică. Deci, la acea vreme, existau legile mecanicii, legile electricității și magnetismului, și legile gravitației.

În jurul anului 1900, a fost dezvoltată o teorie care să explice ce este materia. Ea a fost numită teoria electronică a materiei, și afirmă că în interiorul atomilor există mici particule încărcate cu sarcină electrică. Această teorie a evoluat treptat, până la a include în ea noțiunea de nucleu greu înconjurat de electroni.

Încercările de a înțelege mișcarea electronilor în jurul nucleului folosind legile mecanicii - în mod analog modului în care Newton s-a folosit de ele pentru a determina maniera Pământului de a se învârti în jurul Soarelui - au fost un real eșec: tot felul de predicții au ieșit prost. (Ca un fapt divers, teoria relativității, despre care știți cu toții că a reprezentat o mare revoluție în fizică, a fost și ea descoperită tot cam pe atunci. Însă, prin comparație cu realizarea faptului că în cadrul

atomilor Principiile lui Newton erau cât se poate de false, teoria relativității nu a constituit decât o schimbare minoră.) Punerea la punct a unui alt sistem, care să înlocuiască legile mecanicii, a luat mult timp, pentru că fenomenele de la nivel atomic sunt deosebit de stranii. Pentru a se putea percepe ceea ce se întâmplă la acest nivel, a fost nevoie să se renunțe la bunul-simț. În cele din urmă, în 1926, a fost elaborată o teorie „lipsită de bun-simț", care să explice „noul tip de comportament" al electronilor în cadrul materiei. Arăta cam tembel, dar în realitate nu era așa: ea a fost numită mecanică cuantică. Cuvântul „cuantă" se referă la acest aspect bizar al naturii, care contrazice bunul-simț. Tocmai despre acest aspect am să vă vorbesc eu.

Teoria mecanicii cuantice a explicat, de asemenea, tot felul de amănunte, cum ar fi motivul pentru care un atom de oxigen se combină cu doi atomi de hidrogen pentru a forma o moleculă de apă, și așa mai departe. Astfel, mecanica cuantică a furnizat teoria care se ascunde în spatele chimiei. Deci, chimia teoretică fundamentală înseamnă de fapt fizică.

Datorită faptului că teoria mecanicii cuantice a putut explica toată chimia și diversele proprietăți ale substanțelor, ea a constituit un succes răsunător. Dar mai rămânea problema interacțiunii luminii cu materia. Adică, teoria lui Maxwell referitoare la electromagnetism trebuia modificată pentru a veni în acord cu noile principii care fuseseră formulate pentru mecanica cuantică. Astfel, în 1929, un număr de fizicieni au dezvoltat o nouă teorie, teoria cuantică a interacțiunii luminii cu materia, care este denumită cu oribila titulatură de „electrodinamică cuantică".

Dar teoria întâmpina necazuri. În cazul în care calculai ceva în linii mari, ea furniza rezultate rezonabile. Dar dacă încercai să faci calcule mai exacte, descopereai că micile corecții pe care te așteptai să le aduci (de exemplu, următorul termen dintr-o serie) erau de fapt foarte mari - în fapt, erau *infinite*! Se dovedea deci, că dincolo de o anumită precizie, nu puteai calcula efectiv *nimic*.

Apropo, ceea ce tocmai am punctat, reprezintă ceea ce eu numesc „o istorie a fizicii văzută de un fizician", care nu este niciodată corectă. Ceea ce vă spun eu acum este genul de poveste-mitologie convențională, pe care fizicienii o spun studenților lor, iar acei studenți o spun studenților lor, și care nu are neapărat legătură cu dezvoltarea istorică propriu-zisă, pe care eu nu o cunosc!

În orice caz, pentru a continua cu această „istorie", Paul Dirac, utilizând teoria relativității, a realizat o teorie relativistă a electronului, care nu lua complet în discuție toate efectele interacțiunii electronilor

cu lumina. Teoria lui Dirac susținea că electronul prezintă un moment magnetic - ceva cam ca forța unui mic magnet - a cărui tărie, exprimată în anumite unități de măsură, are exact valoarea 1. Apoi, pe la 1948, s-a descoperit experimental că valoarea efectivă era mai aproape de 1,00118 (cu o marjă de eroare de aproximativ 3 pentru ultima zecimală). Desigur, se știa că electronii interacționează cu lumina, deci o ușoară corecție era de așteptat. De asemenea, era de așteptat ca această corecție să poată fi înțeleasă pornind de la noua teorie a electrodinamicii cuantice. Însă, atunci când s-a calculat, în loc de 1,00118, rezultatul a fost infinit - ceea ce, din punct de vedere experimental, este greșit!

Ei bine, problema modului de a calcula lucrurile în cadrul electrodinamicii cuantice a fost tranșată în jurul anului 1948, de către Julian Schwinger, Sin-Itiro Tomonaga, și de mine. Schwinger a fost primul care a calculat această corecție, folosindu-se de un nou fel de „joc de alba-neagra"; valoarea teoretică obținută de el a fost aproximativ 1,00116, suficient de aproape de cea experimentală pentru a ne indica faptul că ne aflam pe drumul cel bun. Dispuneam, în sfârșit, de o teorie cuantică a electricității și magnetismului cu care să putem calcula! Aceasta este teoria pe care v-o voi descrie.

Teoria electrodinamicii cuantice durează deja de mai bine de cincizeci de ani, și a fost testată cu tot mai multă acuratețe, pentru o gamă tot mai largă de condiții. În prezent, pot să afirm cu mândrie că nu există *nicio diferență semnificativă* între experiment și teorie!

Doar ca să vă faceți o idee despre modul în care teoria a fost trecută prin ciur și prin dârmon, am să vă ofer niște valori recente: experimentele au stabilit numărul lui Dirac la 1,00115965221 (cu o eroare de aproximativ 4 pentru ultima cifră zecimală); teoria ne dă 1,00115965246 (cu o marjă de circa cinci ori mai mare). Pentru a vă da seama de gradul de precizie al acestor măsurători, vă spun așa: dacă ar fi să măsurați distanța de la Los Angeles la New York cu această exactitate, ar însemna să nu greșiți cu mai mult de grosimea unui fir de păr; așa de fin a fost verificată electrodinamica cuantică în ultimii cincizeci de ani - atât din punct de vedere teoretic, cât și experimental. Apropo, eu am ales doar o valoare pe care să v-o prezint, dar există și alte lucruri în cadrul electrodinamicii cuantice care au fost măsurate cu o precizie asemănătoare, și care concordă și ele foarte bine cu teoria. Au fost verificate lucruri ce se întind pe un domeniu care începe de la o sută de ori dimensiunea Pământului și se sfârșește la a suta parte din dimensiunea nucleului atomic. Aceste valori sunt menite să vă intimideze, pentru a vă convinge că probabil teoria nu este prea

deplasată! Către final, am să vă descriu modul în care sunt realizate aceste determinări.

Aş dori să vă impresionez o dată în plus cu vastul domeniu de fenomene pe care le descrie teoria electrodinamicii cuantice. Este mai uşor de afirmat invers: teoria descrie *toate* fenomenele lumii fizice, cu excepţia efectului gravitaţiei, chestia aceea care vă ţine în clipa de faţă pe scaune (de fapt, cred că aici este vorba de o combinaţie între gravitaţie şi politeţe), şi a fenomenelor legate de radioactivitate, ce implică trecerea nucleelor de pe un nivel energetic pe altul. Deci, dacă lăsăm deoparte gravitaţia şi radioactivitatea (mai corect spus, fizica nucleară), cu ce mai rămânem? Benzina arzând în motoarele automobilelor, spuma şi baloanele de săpun, duritatea sării sau a cuprului, rigiditatea oţelului. În fapt, biologii încearcă să interpreteze în termeni de chimie cât pot de multe lucruri referitoare la viaţă şi, aşa cum v-am spus deja, teoria din spatele chimiei este electrodinamica cuantică.

Trebuie să clarific ceva: atunci când afirm că toate fenomenele lumii fizice pot fi explicate de această teorie, nu înseamnă că noi chiar ştim asta. Majoritatea fenomenelor ce ne sunt familiare implică numere atât de *copleşitoare* de electroni, încât este greu pentru săracele noastre minţi să urmărească această complexitate. În asemenea situaţii, putem folosi teoria pentru a realiza, în linii mari, ce ar trebui să se întâmple; şi, în linii mari, în aceste condiţii, chiar asta *se* întâmplă. Dar, dacă realizăm în laborator un experiment care implică doar *câţiva* electroni, în circumstanţe *simple*, atunci putem calcula foarte exact ce ar trebui să se întâmple şi, de asemenea, putem măsura aceasta foarte precis. Ori de câte ori efectuăm astfel de experimente, teoria electrodinamicii cuantice funcţionează foarte bine.

Noi, fizicienii, verificăm tot timpul pentru a vedea dacă nu cumva sunt probleme cu teoria. Aşa merg treburile, căci dacă sunt probleme cu teoria, este interesant! Dar până acum nu am găsit nimic în neregulă cu teoria electrodinamicii cuantice. Ca atare, aş spune că ea este giuvaierul fizicii - cea mai mândră posesiune a noastră.

Teoria electrodinamicii cuantice reprezintă, de asemenea, şi prototipul pentru noi teorii, care încearcă să explice fenomenele nucleare, lucrurile ce se petrec în interiorul nucleelor atomilor. Dacă lumea fizică ar fi gândită ca o scenă, atunci actorii nu ar fi numai electronii, care se găsesc în afara nucleului atomic, ci şi quarkurile şi gluonii şi celelalte particule - zeci de feluri - din interiorul nucleului. Şi deşi aceşti „actori" par cât se poate de diferiţi unii de alţii, ei se

comportă toți într-un anumit fel - un fel straniu și ciudat - maniera „cuantică". La final, vă voi vorbi un pic despre particulele nucleare. Între timp, pentru a nu ne complica, am să vă vorbesc doar despre fotoni - particulele de lumină - și despre electroni. Pentru că ceea ce este important este *modul* în care aceștia se comportă, iar acest mod este foarte interesant.

Deci, acum știți despre ce am să vă vorbesc. Următoarea întrebare este: veți *înțelege* oare ceea ce vă voi spune? Oricine vine la o prelegere științifică, știe că n-o va înțelege, dar poate că cel care o susține are o cravată frumos colorată la care să te uiți. Nu și în acest caz! (Feynman nu poartă cravată.)

Ceea ce am să vă spun, reprezintă lucrurile pe care le predăm studenților noștri de la fizică în anul trei sau patru de facultate... și dumneavoastră vă închipuiți că eu am să vă explic astfel încât să puteți înțelege? Nu, n-o să fiți în stare să înțelegeți. Și atunci, de ce să mai stați să pierdeți timpul aici, dacă tot n-o să fiți în stare să înțelegeți ce am să vă spun? Revine în sarcina mea să vă conving să *nu* dați bir cu fugiții pe motiv că nu înțelegeți. Vedeți dumneavoastră, nici studenții mei nu înțeleg. Asta din cauză că nici *eu* nu înțeleg. Nimeni nu înțelege.

Aș dori să vorbesc un pic despre înțelegere. Atunci când se ține o prelegere, există multe motive pentru care s-ar putea să nu-l înțelegeți pe vorbitor. Unul ar fi acela că el se exprimă prost - nu spune ce ar vrea să spună, sau o spune alambicat - și este greu de urmărit. Aceasta este o chestiune mai degrabă trivială, iar eu îmi voi da toată silința să evit pe cât posibil accentul meu de New York.

Un alt motiv, mai ales dacă vorbitorul este fizician, ar putea fi acela că el folosește cuvinte obișnuite într-o manieră ciudată. Fizicienii folosesc adesea cuvinte obișnuite precum „lucru mecanic" [*work* = *muncă*, în engleză, în original (n.t.)], ori „acțiune", ori „energie", sau chiar, așa cum veți vedea, „lumină", cu cine știe ce înțelesuri tehnice. Așa încât, atunci când vorbesc despre „muncă" în cadrul fizicii, nu mă refer la același lucru cu „munca" din jurul nostru. Pe parcursul acestei prelegeri, s-ar putea să folosesc unul din aceste cuvinte, fără să bag de seamă că l-am utilizat în această manieră neobișnuită. Voi face tot posibilul să mă controlez - sunt deformații profesionale - dar este vorba de o greșeală ce poate fi făcută foarte ușor.

Următorul motiv pentru care ați putea crede că nu înțelegeți ceea ce vă spun, este acela că, în vreme ce eu v-aș descrie *cum* funcționează natura, dumneavoastră să nu pricepeți *de ce* funcționează ea

aşa. Nu vă pot explica motivul pentru care natura se comportă în acest mod ciudat.

În fine, există şi această posibilitate: după ce eu vă spun ceva, dumneavoastră să nu vă vină pur şi simplu să credeți. Să nu puteți accepta aşa ceva. Să nu vă placă. Să vi se lase o perdea şi să nu mai urmăriți. Eu vă voi descrie cum arată natura - iar dacă dumneavoastră vă va displăcea, lucrul acesta va sta în calea înțelegerii. Este o problemă cu care fizicienii au învățat cum să se împace: chestiunea esențială *nu* este dacă le place sau nu le place lor o teorie. Mai degrabă, este dacă teoria oferă sau nu predicții care să concorde cu experimentul. Nu se pune problema dacă o teorie este sau nu încântătoare din punct de vedere filosofic, sau dacă este uşor de înțeles, sau dacă este absolut rezonabilă din perspectiva bunului-simț. Din acest punct de vedere, teoria electrodinamicii cuantice descrie natura ca fiind absurdă. Dar concordă totalmente cu experimentul. Astfel încât sper că veți accepta natura aşa cum este ea - absurdă.

Îmi va face plăcere să vă vorbesc despre această absurditate, deoarece eu o găsesc încântătoare. Vă rog să nu vă întoarceți gândul de la ea din cauză că nu puteți crede că natura este atât de stranie. Pur şi simplu ascultați-mă, şi cred că la final veți fi la fel de încântați ca mine.

Cum am să vă explic dumneavoastră lucrurile pe care nu le explic nici măcar studenților mei mai înainte ca ei să ajungă în anul trei de facultate? Dați-mi voie să vă lămuresc printr-o analogie. Indienii Maya se preocupau de răsăritul şi de apusul planetei Venus ca de o „stea“ de dimineață şi o „stea“ de seară - erau foarte interesați de momentul la care urma ea să apară pe cer. După ani de observații, ei au sesizat că cinci cicluri ale lui Venus corespundeau aproape exact la opt „ani normali“ de-ai lor, de câte 365 de zile (cunoşteau şi că anul real, cel cu anotimpurile, era uşor diferit, şi îl determinaseră şi pe acesta). Pentru a calcula, ei au inventat un sistem de bare şi puncte pentru a reprezenta numerele (inclusiv pe zero), şi dispuneau de reguli de calcul pentru prezicerea nu numai a răsăritului şi apusului lui Venus, ci şi a altor fenomene cereşti, cum ar fi eclipsele de lună.

Pe atunci, doar câțiva preoți Maya puteau efectua astfel de calcule laborioase. Acuma, să presupunem că l-ați fi întrebat pe unul din ei cum se face unul doar din paşii procesului de predicție a momentului în care Venus răsare ca stea de dimineață - anume, scăderea a două numere. Şi, contrar zilelor noastre, să presupunem că

nu ați fi mers la școală și că nu ați ști să scădeți. Cum v-ar fi explicat preotul ce anume este scăderea?

Fie v-ar fi putut învăța numerele reprezentate de bare și puncte și regulile de „scădere" a lor, fie v-ar fi putut spune ce face propriu-zis: „Să zicem că vrem să scădem 236 din 584; numărăm mai întâi 584 de boabe și le punem în oală; apoi scoatem 236 de boabe și le dăm deoparte; în cele din urmă, numărăm boabele rămase în oală; acel număr reprezintă rezultatul scăderii 584 fără 236."

Ați putea exclama: „Pe Quetzalcoat-ul meu! Ce *salahorie* - să numeri boabe, să le pui în oală, să le scoți - halal slujbă!"

La care preotul v-ar putea replica: „De-aia avem regulile pentru bare și puncte. Regulile sunt complicate, dar reprezintă un mod mult mai eficient de a obține răspunsul decât număratul boabelor. Lucrul important este acela că, atât cât privește *răspunsul*, nu contează: se poate prevedea apariția lui Venus numărând boabe (ceea ce este lent, dar ușor de înțeles), sau folosind reguli complicate (ceea ce este mult mai rapid, dar necesită să-ți petreci mulți ani la școală pentru a le învăța)."

Realmente nu este greu să înțelegeți *cum* funcționează scăderea... atâta timp cât nu trebuie să o efectuați propriu-zis. Aceasta este poziția mea: vă voi explica ce *fac* fizicienii atunci când prezic modul în care urmează să se comporte natura, dar nu vă voi învăța nicio șmecherie prin care dumneavoastră să o puteți face *în mod eficient*. Veți descoperi că, pentru a face orice predicție rezonabilă cu ajutorul acestei noi scheme a electrodinamicii cuantice, va trebui să trasați o puzderie de săgetuțe pe foaia de hârtie. Durează șapte ani - patru ani de studii universitare și trei de studii postuniversitare - să-i antrenăm pe studenții noștri de la fizică să facă acest lucru într-o manieră complicată, eficientă. Vom sări aici peste șapte ani de educație în fizică: explicându-vă electrodinamica cuantică în termeni de ceea ce *facem propriu-zis*, eu sper ca dumneavoastră să fiți în stare să o înțelegeți mai bine decât unii din studenții noștri!

Extinzând exemplul cu indienii Maya un pas mai departe, l-ați putea întreba pe preot *de ce* cinci cicluri ale lui Venus sunt aproximativ egale cu 2920 de zile, sau opt ani. Ar putea exista tot felul de teorii referitoare la *motivul* acesta, cum ar fi: „20 este un număr important în sistemul nostru de numerație, iar dacă împarți 2920 la 20, obții 146, care este cu o unitate mai mare decât un număr ce poate fi exprimat ca sumă de două pătrate în două feluri diferite, etc." Dar acea teorie n-ar avea realmente nicio legătură cu Venus. În zilele noastre, am descoperit că astfel de teorii sunt inutile. Deci, încă o dată,

nu ne vom ocupa de *motivul* pentru care natura se comportă în maniera ciudată în care o face; nu există teorii ca lumea care să explice aceasta.

Ceea ce am făcut până aici, a fost să vă introduc în atmosfera corespunzătoare pentru a mă urmări. În caz contrar, nu avem nicio şansă. Deci acum suntem gata, îi dăm drumul!

Începem cu lumina. Atunci când Newton a început să studieze lumina, primul lucru pe care l-a descoperit, a fost acela că ea reprezintă un amestec de culori. El a descompus lumina albă într-o varietate de culori, trecând-o printr-o prismă. Însă, atunci când a trecut, mai departe, lumina de o singură culoare - de exemplu, roşie - încă printr-o prismă, el a descoperit că aceasta nu putea fi separată mai mult de atât. Astfel, Newton a găsit că lumina albă este un amestec de diferite culori, fiecare din ele în stare pură, în sensul că ele nu pot fi descompuse la rândul lor.

(De fapt, o lumină de o culoare dată mai poate fi separată încă într-un anumit fel, în funcţie de aşa-numita „polarizare" a ei. Acest aspect în legătură cu lumina nu este vital pentru înţelegerea caracterului electrodinamicii cuantice, aşa încât, pentru simplitate, nu îl voi lua în discuţie... cu preţul de a nu vă oferi o descriere absolut completă a teoriei. Această uşoară simplificare nu va ştirbi, în niciun fel, niciun pic din înţelegerea efectivă a lucrurilor despre care vă voi vorbi. Totuşi, trebuie să fiu atent să menţionez toate lucrurile pe care le voi omite.)

Atunci când pronunţ cuvântul „lumină" pe parcursul acestor prelegeri, nu mă refer doar la lumina pe care o putem vedea, începând cu roşul şi terminând cu albastrul. Se dovedeşte că lumina vizibilă reprezintă doar o parte a unei lungi scări, analoage unei game muzicale în care există şi note muzicale mai ascuţite decât puteţi dumneavoastră auzi, şi altele mai joase decât puteţi dumneavoastră auzi. Scara luminii poate fi descrisă prin numere - denumite frecvenţe - şi, pe măsură ce valorile lor cresc, lumina trece de la roşu la albastru, la violet, la ultraviolet... Noi nu putem vedea lumina ultravioletă, dar ea impresionează plăcile fotografice. E tot lumină - numai valoarea frecvenţei este alta. (N-ar trebui să fim atât de nereceptivi: pe lume mai există şi alte lucruri în afară de cele pe care le putem detecta în mod direct cu instrumentul nostru, ochiul.) Dacă pur şi simplu modificăm în continuare valoarea numărului, pătrundem în domeniul razelor X, al razelor gamma, şi aşa mai departe. Dacă variem numărul în cealaltă

direcție, trecem de la albastru la roşu, la radiații infraroşii (căldură), la semnale de televiziune şi la unde radio. Pentru mine, toate acestea înseamnă „lumină". În majoritatea exemplelor pe care le voi da, voi folosi doar lumină roşie, dar teoria electrodinamicii cuantice se extinde asupra întregului domeniu pe care vi l-am descris, şi reprezintă teoria din spatele tuturor acestor diverse fenomene.

Newton gândea că lumina este alcătuită din particule - el le numea „corpusculi" - şi avea dreptate (însă raționamentul care îl condusese la această concluzie era greşit). Noi ştim că lumina este alcătuită din particule, pentru că avem la dispoziție un aparat foarte sensibil, care clicăie atunci când este iluminat, iar dacă iluminarea devine mai slabă, păcăniturile rămân la fel de tari... doar că mai rare. Ca atare, lumina este ceva precum picăturile de ploaie - fiecare mic bulgăr de lumină este numit foton - iar dacă lumina este toată de o singură culoare, toate „picăturile de ploaie" au aceeaşi dimensiune.

Ochiul omenesc este un aparat foarte bun: este nevoie numai de cinci sau şase fotoni pentru a activa o celulă nervoasă şi a trimite un semnal către creier. Dacă am fi evoluat încă un pic, astfel încât văzul nostru să fie de zece ori mai sensibil, nu am mai fi stat acum să purtăm această discuție: cu toții am fi înregistrat lumina foarte slabă, de o singură culoare, ca pe o serie de mici scânteieri intermitente, cu intensități egale.

V-ați putea întreba cum să fie posibil de detectat un singur foton. Un aparat care poate face aceasta se numeşte fotomultiplicator, şi vă voi descrie pe scurt cum funcționează el. Atunci când un foton loveşte placa metalică A de jos (a se vedea Figura 1), el face ca un electron să scape din unul din atomii plăcii. Electronul liber este atras puternic de placa B (care are pe ea sarcini pozitive) şi o loveşte cu suficientă forță pentru a elibera trei sau patru alți electroni. Fiecare din electronii extraşi din placa B este atras de placa C (care este, de asemenea, încărcată electric), şi ciocnirile lor cu placa C generează încă şi mai mulți electroni liberi. Acest proces se repetă de zece-douăsprezece ori, până când ultima placă, L, este lovită de milioane de electroni, ceea ce este suficient pentru a produce un curent electric sesizabil. Acest curent poate fi amplificat de către un amplificator obişnuit şi trimis către un difuzor, care să producă păcănituri audibile. De fiecare dată când un foton de o culoare anume loveşte fotomultiplicatorul, se aude un clic de tărie constantă.

Dacă aşezați o grămadă de fotomultiplicatori de jur împrejur şi faceți să se emită o lumină slabă în diverse direcții, aceasta pătrunde într-unul sau altul din fotomultiplicatori şi produce un clic de

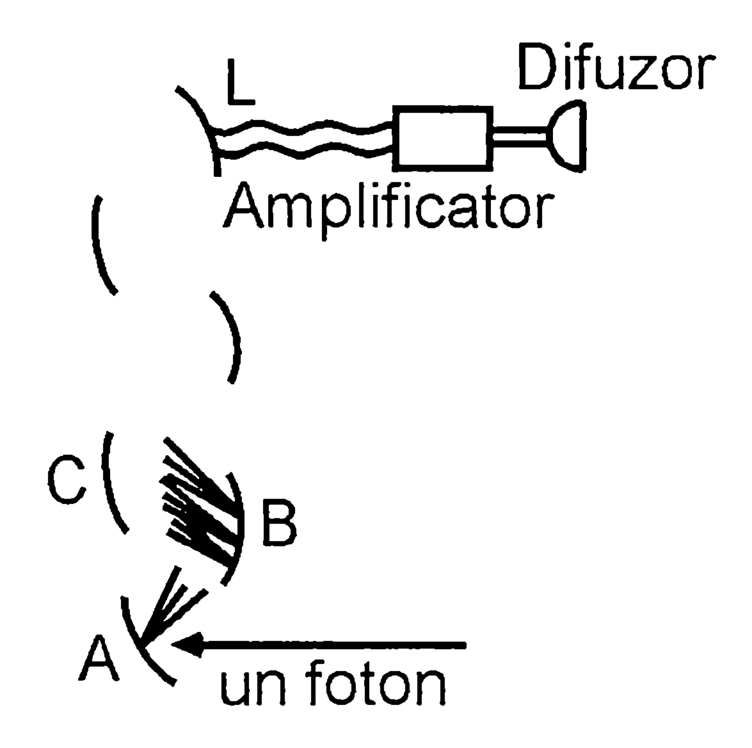


Figura 1. Un fotomultiplicator poate detecta un foton singular. Atunci când un foton loveşte placa A, este extras un electron, iar acesta este atras de placa B, încărcată pozitiv, eliberând din ea mai mulţi electroni. Procesul continuă până când miliarde de electroni lovesc ultima placă, L, şi produc un curent electric, ce este amplificat într-un amplificator obişnuit. Dacă se conectează un difuzor la amplificator, se pot auzi clicuri cu tărie constantă, de fiecare dată când un foton de o culoare dată loveşte placa A.

intensitate întreagă. Este totul sau nimic: dacă la un moment dat se declanşează unul din fotomultiplicatori, atunci niciun altul nu se va declanşa în acel moment (cu excepţia rarei situaţii în care s-ar întâmpla ca doi fotoni să părăsească sursa de lumină în acelaşi timp). Nu există o despicare a luminii în „jumătăţi de particulă“, care să o ia în direcţii diferite.

Vreau să accentuez că lumina ne parvine sub această formă - ca particule. Este foarte important de ştiut că lumina se comportă ca nişte particule, mai ales pentru aceia dintre dumneavoastră care aţi urmat cursuri de fizică la şcoală, în care vi s-a spus probabil cum că ea s-ar comporta ca o undă. Eu *chiar* vă spun cum se comportă lumina - ca nişte particule.

Aţi putea afirma că la mijloc este doar fotomultiplicatorul, care detectează lumina ca pe particule; însă nu, orice aparat proiectat a fi suficient de sensibil pentru a detecta o lumină slabă, sfârşeşte invariabil prin a găsi acelaşi lucru: faptul că lumina este alcătuită din particule.

* * *

Voi presupune că vă sunt foarte familiare proprietățile luminii în situațiile din viața de zi cu zi - lucruri precum acelea că lumina se propagă în linie dreaptă, că la intrarea în apă direcția luminii se frânge, că atunci când lumina este reflectată de o suprafață cum ar fi cea a unei oglinzi, unghiul sub care ea lovește acea suprafață este egal cu cel sub care părăsește suprafața, că lumina poate fi descompusă în culori, astfel încât, dacă pe suprafața unei bălțoace este puțin ulei, se pot vedea culori minunate, că lentilele focalizează lumina, şi aşa mai departe. Voi utiliza aceste fenomene care vă sunt familiare, pentru a ilustra comportarea cu adevărat stranie a naturii; voi explica aceste fenomene în termeni ai teoriei electrodinamicii cuantice. V-am vorbit despre fotomultiplicator, pentru a ilustra un fenomen esențial, care s-ar putea să nu vă fie familiar - acela că lumina este alcătuită din particule - dar de acum sper că şi acesta vă este familiar!

Acuma, eu cred că tuturor vă este familiar fenomenul prin care lumina este parțial reflectată de suprafețe precum cea a apei. Nu puține sunt tablourile în care lumina lunii se reflectă pe suprafața unui lac. (Şi nu de puține ori ați intrat în bucluc *din cauza* luminii lunii care se reflecta pe suprafața unui lac.) Atunci când priviți în apă, puteți vedea ceea ce se găseşte în adâncul ei (mai ales pe timpul zilei), dar puteți vedea, de asemenea, şi o reflectare pe suprafața ei. Un alt exemplu îl constituie sticla: dacă aprindeți lumina în cameră pe timpul zilei, puteți vedea pe fereastră lucrurile de afară, dar şi o slabă reflectare a lămpii din casă. Deci lumina este parțial reflectată de către suprafața geamului.

Înainte de a merge mai departe, doresc să fiți conştienți de o simplificare pe care o voi face, şi pe care o voi corija mai încolo. Atunci când voi vorbi despre reflexia parțială a luminii pe sticlă, voi considera că lumina este reflectată doar de *suprafața* sticlei. În realitate, o bucată de geam reprezintă un monstru de complexitate - electroni într-un număr uriaş, vânzolindu-se de colo-colo. Atunci când pătrunde un foton, el interacționează cu electroni *de peste tot* din sticlă, nu doar cu cei de la suprafață. Fotonul şi electronii se angajează într-un fel de dans, al cărui rezultat de ansamblu este acelaşi ca şi când fotonul ar lovi numai suprafața. Aşa încât, o vreme, dați-mi voie să fac această simplificare. Mai târziu, vă voi arăta ce se petrece efectiv în interiorul sticlei, astfel încât să puteți înțelege de ce rezultatul este acelaşi.

Acum aş dori să vă descriu un experiment şi să vă comunic rezultatele lui surprinzătoare. În cadrul acestui experiment, câțiva fotoni de aceeaşi culoare - să zicem, lumină roşie - sunt emişi de către o sursă de lumină (a se vedea Figura 2) către un bloc de sticlă. În

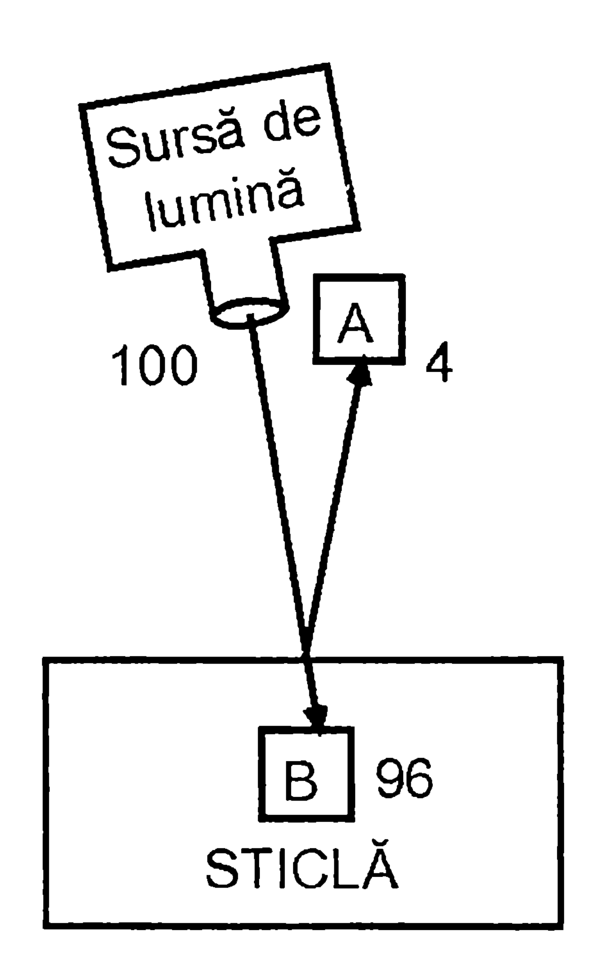


Figura 2. Un experiment pentru măsurarea reflexiei parțiale a luminii pe suprafața singulară a sticlei. Pentru fiecare 100 de fotoni ce părăsesc sursa de lumină, 4 sunt reflectați de către suprafața superioară și sfârșesc în fotomultiplicatorul din punctul A, iar ceilalți 96 sunt transmiși de suprafață și sfârșesc în fotomultiplicatorul din B.

punctul A, deasupra sticlei, se plasează un fotomultiplicator, pentru a capta orice fotoni care vor fi fiind reflectați de suprafața superioară a sticlei. Pentru a măsura câți fotoni trec dincolo de această suprafață, în punctul B din interiorul sticlei se plasează un alt fotomultiplicator. Nu ne vom preocupa de dificultățile evidente ale introducerii unui fotomultiplicator într-un bloc de sticlă. Care va fi rezultatul experimentului?

Pentru fiecare 100 de fotoni care coboară drept spre sticlă la 90°, în medie 4 ajung în punctul A și 96 în B. Deci, în acest caz, „reflexia parțială" înseamnă că 4% din fotoni sunt reflectați de către suprafața superioară, în vreme ce ceilalți 96% sunt transmiși. *Deja* ne aflăm în mare încurcătură: cum poate fi lumina reflectată *parțial*? Fiecare foton sfârșește în punctul A sau în punctul B - cum „se hotărăște" fotonul dacă să o ia spre A sau spre B? (Publicul râde.) S-ar putea să sune ca o glumă, dar nu putem doar să stăm să râdem; o să trebuiască să explicăm aceasta în termeni ai unei teorii! Reflexia parțială constituie din start un mister adânc, și a reprezentat pentru Newton o problemă dificilă.

Există câteva teorii posibile care ar putea fi elaborate pentru a da socoteală de reflexia parțială a luminii pe sticlă. Una din ele este aceea că 96% din suprafața sticlei este „găurită", lăsând să treacă

lumina, în timp ce 4% din suprafață este acoperită de mici „petice" de material reflectător (a se vedea Figura 3). Newton și-a dat seama că aceasta nu constituie o explicație posibilă.[1] Vom întâlni imediat o trăsătură ciudată a reflexiei parțiale, care vă va scoate din minți dacă veți încerca să vă cramponați de o teorie cu „găuri și petice" - sau de orice altă teorie rațională.

O altă posibilă teorie este aceea că fotonii au vreun soi de mecanism intern - „rotițe" și „pinioane" lăuntrice, care se angrenează cumva - astfel încât, atunci când un foton este „țintit" exact cum trebuie, el trece prin sticlă, iar când nu este țintit ca lumea, se reflectă. Putem verifica această teorie, încercând să filtrăm fotonii care nu sunt țintiți cum trebuie, prin intercalarea câtorva straturi suplimentare de sticlă între sursă și primul strat. După trecerea prin filtre, fotonii care ar ajunge la suprafața sticlei ar fi *toți* țintiți cum trebuie, și nici unul din ei n-ar trebui să se reflecte. Necazul cu această teorie este că ea nu concordă cu experimentul: chiar și după ce trec prin multe straturi de sticlă, 4% din fotonii ce ajung la o anumită suprafață, se reflectă pe ea.

Oricât am încerca să inventăm o teorie rezonabilă care să explice cum „se hotărăște" un foton dacă să o ia prin sticlă sau să ricoșeze de ea, este imposibil de prezis ce cale va alege fotonul. Filosofii au afirmat că dacă aceleași circumstanțe nu conduc mereu la aceleași rezultate, atunci predicțiile sunt imposibile și știința se va nărui. Iată o circumstanță - fotoni identici cad tot timpul pe aceeași bucată de sticlă, pe aceeași direcție - care generează rezultate diferite. Nu putem prezice dacă un foton va ajunge în A sau în B. Tot ce putem prezice, este că din 100 de fotoni care cad, o medie de 4 vor fi reflectați de suprafața superioară. Înseamnă oare aceasta că fizica, o știință de mare precizie, a fost redusă la a calcula doar *probabilitatea* unui eveniment, și nu la a prezice exact ceea ce se va întâmpla? Da. Acest lucru constituie un

---

[1] De unde știa? Newton a fost un foarte mare om de știință. El a scris: „din cauză că pot să lustruiesc sticla". V-ați putea întreba: cum naiba putea el să-și dea seama că posibilitatea de a lustrui sticla însemna că nu avea cum să fie vorba de găuri și petice? Newton își lustruia singur lentilele și oglinzile, și știa ce făcea prin aceasta: zgâria suprafața sticlei cu pulberi abrazive din ce în ce mai fine. Pe măsură ce zgârieturile deveneau din ce în ce mai fine, aspectul sticlei se schimba de la un gri tern (din cauză că lumina era împrăștiată de zgârieturile groase), la o limpezime de cristal (pentru că zgârieturile extrem de fine lăsau lumina să treacă). Astfel, el a priceput că era imposibil de acceptat presupunerea că lumina ar putea fi afectată de neregularități foarte mici precum zgârieturile, ori găurile și peticele; în fapt, el a descoperit contrariul: cele mai fine zgârieturi și, în consecință, peticele la fel de mici, nu afectează lumina. Deci, teoria găurilor și peticelor era eronată.

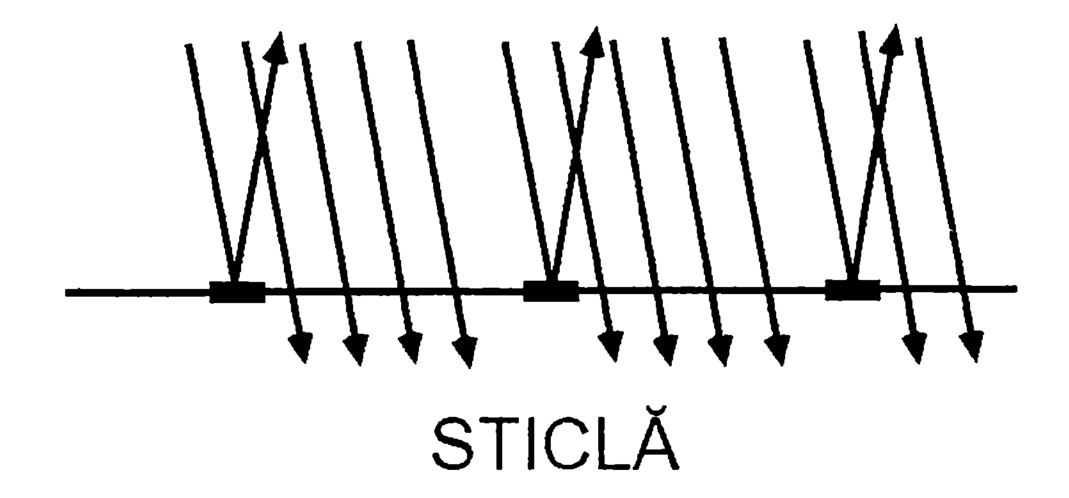


Figura 3. Una din teoriile care să explice reflexia parțială a luminii pe o suprafață singulară de sticlă, implică o suprafață alcătuită în principal din „găuri" ce lasă să treacă lumina, şi câteva „petice" care o reflectă.

regres, dar asta-i situația. Natura ne permite să calculăm numai probabilități. Totuşi, ştiința nu s-a năruit.

Dacă reflexia parțială a luminii pe o suprafață singulară reprezintă un mister adânc şi o problemă dificilă, reflexia parțială pe două sau mai multe suprafețe este absolut aiuritoare. Dați-mi voie să vă arăt de ce. Vom face un al doilea experiment, în care vom măsura reflexia parțială a luminii pe două suprafețe. Înlocuim blocul de sticlă cu un strat foarte subțire de sticlă - cele două fețe ale lui sunt absolut paralele - şi plasăm fotomultiplicatorul sub el, în dreptul sursei. De data aceasta, pentru a sfârşi în punctul A, fotonii se pot reflecta fie pe fața superioară, fie pe cea inferioară; toți ceilalți vor sfârşi în B (a se vedea Figura 4). Ne-am putea aştepta ca suprafața superioară să reflecte 4% din lumină, iar cea inferioară să reflecte 4% din cele 96 de procente rămase, totalizând astfel circa 8%. Deci, ar trebui să găsim că, din fiecare 100 de fotoni ce părăsesc sursa de lumină, în jur de 8 sosesc în punctul A.

Ceea ce se întâmplă de fapt în aceste condiții experimentale atent controlate, este că numărul de fotoni care ajung în punctul A este arareori 8 din 100. Cu anumite plăcuțe de sticlă, obținem în mod repetat 15 sau 16 fotoni - de două ori cât ne-am fi aşteptat! Cu alte lame de sticlă, obținem regulat 1 sau 2 fotoni. Alte straturi prezintă o reflexie totală de 10%; altele elimină cu totul reflexia parțială! Oare ce anume ar putea sta la baza acestor rezultate nebuneşti? Dacă verificăm

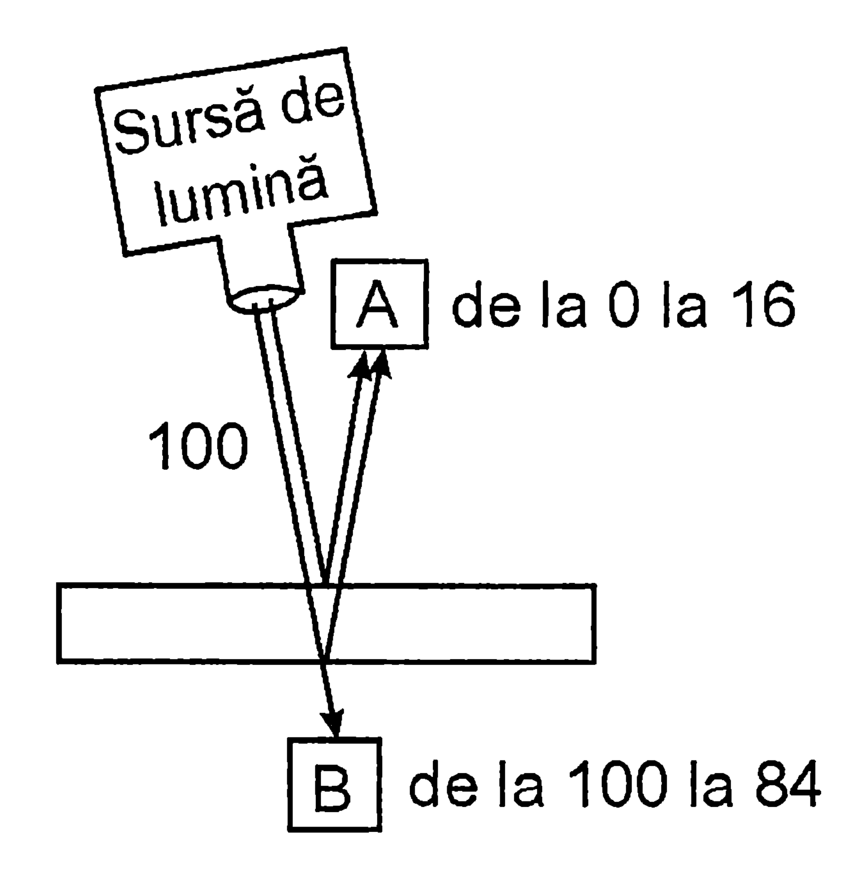


Figura 4. Un experiment pentru măsurarea reflexiei parțiale a luminii pe două suprafețe de sticlă. Fotonii pot ajunge la fotomultiplicatorul din punctul A, reflectându-se fie pe suprafața superioară, fie pe suprafața inferioară a foiței de sticlă; în caz contrar, ei pot traversa ambele suprafețe și sfârșesc lovind fotomultiplicatorul din punctul B. În funcție de grosimea sticlei, la fotomultiplicatorul din A ajung între 0 și 16 fotoni din 100. Aceste rezultate ridică probleme pentru orice teorie rațională, inclusiv pentru cea din Figura 3. Pare că reflexia parțială poate fi „închisă“ ori „amplificată“ de prezența unei suprafețe adiționale.

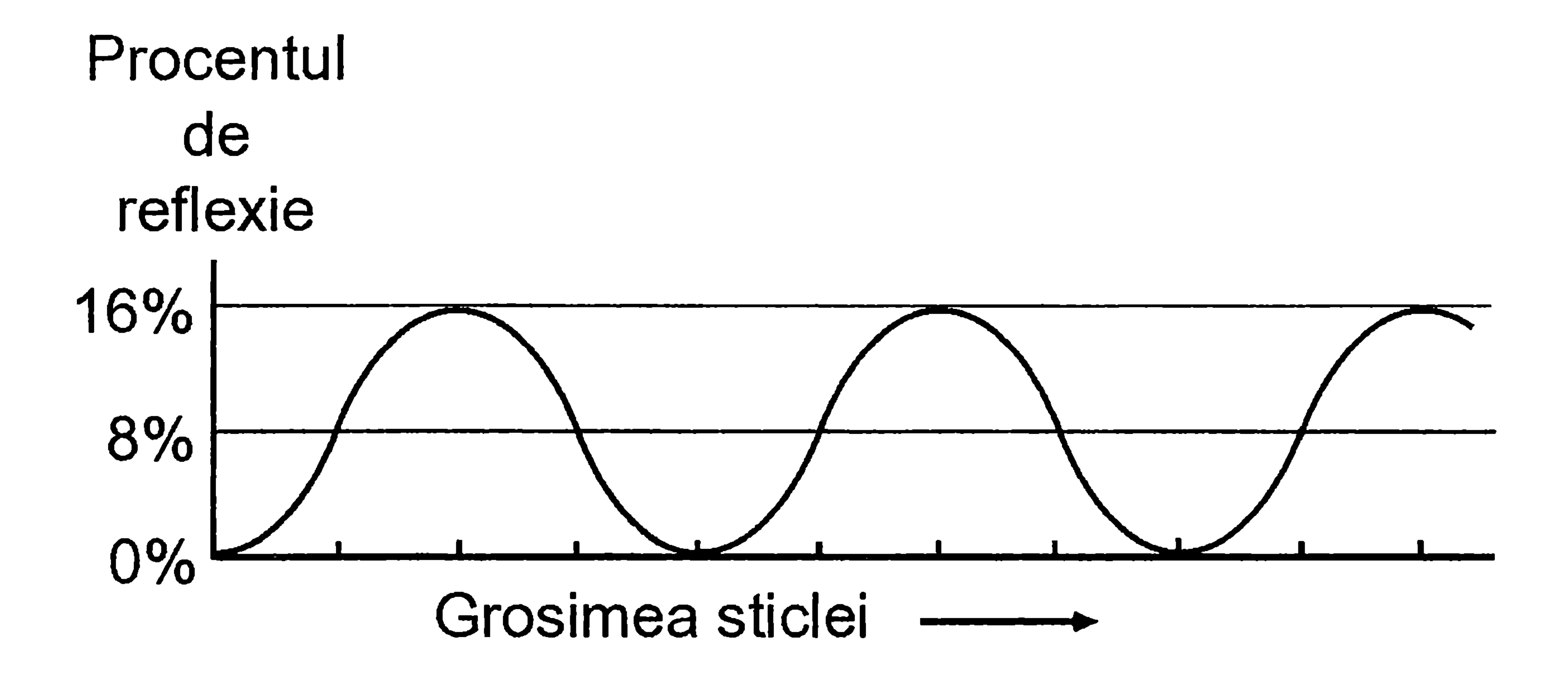


Figura 5. Rezultatele unui experiment de măsurare atentă a relației dintre grosimea unei foițe de sticlă și reflexia parțială, pun în evidență un fenomen numit „interferență“. Pe măsură ce grosimea sticlei crește, reflexia parțială urmează un ciclu de la zero la 16%, care se tot repetă, fără a da semne că s-ar estompa la un moment dat.

diferitele lame de sticlă în privința calității și uniformității lor, descoperim că ele diferă doar ca grosime, foarte puțin.

Pentru a verifica ideea potrivit căreia cantitatea de lumină reflectată de cele două suprafețe ar depinde de grosimea sticlei, haideți să facem o serie de experimente. Începând cu cel mai subțire strat de sticlă posibil, vom număra câți fotoni lovesc fotomultiplicatorul din punctul A de fiecare dată când 100 de fotoni părăsesc sursa de lumină. Apoi vom înlocui stratul de sticlă cu unul un pic mai gros, și vom face o nouă numărare. După ce vom fi repetat acest lucru de câteva zeci de ori, la ce rezultate vom fi ajungând?

În cazul celui mai subțire strat de sticlă posibil, găsim că numărul de fotoni care ajung în punctul A este totdeauna aproape zero - câteodată mai este și 1. Atunci când înlocuim stratul cel mai subțire cu unul un pic mai gros, descoperim o creștere a cantității de lumină reflectată - aproape de așteptatul 8%. Pe măsură ce continuăm înlocuirile cu straturi de sticlă încă și mai „groase" - am ajuns în acest moment undeva în jurul a o zecime de micron - cantitatea de lumină reflectată de cele două suprafețe atinge un maxim de 16%, iar apoi începe să scadă, trecând prin 8%, până înapoi la zero - dacă stratul de sticlă are fix o anumită grosime, reflexia dispare. (Încercați să gândiți *asta* prin prisma ideii de petice reflectătoare!)

Cu straturi de sticlă din ce în ce mai groase, reflexia parțială crește din nou până la 16% și apoi revine la zero - un ciclu care se repetă iar și iar (a se vedea Figura 5). Newton a descoperit aceste oscilații, și a efectuat un experiment care ar putea fi interpretat în mod corect numai în cazul în care ele ar continua pe parcursul a cel puțin 34.000 de cicluri! În zilele noastre, cu ajutorul laserelor (care produc o lumină foarte pură, monocromatică), putem observa că ciclul își păstrează tăria chiar și după mai mult de 100.000.000 de repetări - ceea ce corespunde unei grosimi a sticlei mai mari de 50 de metri. (În viața de zi cu zi nu vedem acest fenomen, din cauză că în mod normal sursele de lumină nu sunt monocromatice.)

Așadar, se vădește că predicția noastră de 8% este corectă ca o medie pe ansamblu (întrucât valoarea efectivă variază după un tipar regulat, între zero și 16%), însă ea nu concordă exact decât de două ori pe ciclu - asemenea unui ceas stricat, care arată ora exactă de două ori pe zi. Cum putem explica această trăsătură stranie a reflexiei parțiale, de a depinde de grosimea sticlei? Cum poate suprafața superioară să reflecte 4% din lumină (așa cum s-a confirmat în primul nostru experiment), când noi, așezând o a doua suprafață dedesubt, la exact distanța potrivită, putem cumva să „închidem" reflexia? Iar așezând

acea a doua suprafață la o distanță puțin diferită, putem să „amplificăm" reflexia până la 16%! S-ar putea oare ca suprafața inferioară să exercite vreun soi de influență ori efect asupra capacității suprafeței superioare de a reflecta lumina? Și dacă am introduce o *a treia* suprafață?

Cu o a treia suprafață, sau cu orice alt număr de suprafețe ulterioare, cantitatea de reflexie parțială se schimbă din nou. Ne pomenim aventurându-ne tot mai în jos, suprafață după suprafață, în încercarea noastră de a ajunge la suprafața ultimă. Trebuie oare să facă un foton așa ceva pentru a se „decide", după cum afirmă teoria noastră, dacă să se reflecte sau nu pe prima suprafață?

Newton a avansat un număr de argumente ingenioase privitoare la această problemă,[2] dar, în final, și-a dat seama că încă nu dezvoltase o teorie satisfăcătoare.

Multă vreme după Newton, reflexia parțială pe două suprafețe a fost explicată, fără mari bătăi de cap, prin intermediul unei teorii a

---

[2] Este un lucru foarte norocos pentru noi faptul că Newton s-a convins pe sine că lumina reprezintă niște corpusculi, deoarece putem vedea astfel prin câte trebuie să treacă o minte proaspătă și inteligentă, ce studiază acest fenomen al reflexiei parțiale, în încercarea de a-l explica. (Cei ce au considerat că lumina este o undă, nu au fost niciodată nevoiți să se ia la trântă cu el.) Newton a argumentat după cum urmează. Deși lumina pare că este reflectată de către prima suprafață, nu se poate ca ea să fie reflectată de către aceasta. Dacă ar fi așa, atunci cum ar fi posibil ca ea să fie recapturată, în situația în care grosimea s-ar presupune că are o asemenea valoare încât să nu existe deloc reflexie? Deci lumina trebuie să fie reflectată de a doua suprafață. Iar pentru a da socoteală de faptul că grosimea sticlei determină cantitatea de reflexie parțială, Newton a propus următoarea idee: lumina care cade pe prima suprafață generează un soi de undă sau câmp, care călătorește alături de lumină, și care o predispune pe aceasta să se reflecte sau nu pe a doua suprafață. El a numit acest proces „toane de a se reflecta ușor sau de a se transmite ușor", ele manifestându-se în cicluri, în funcție de grosimea sticlei.
Această idee prezintă două dificultăți. Prima o constituie efectul suprafețelor suplimentare – fiecare nouă suprafață afectează reflexia – pe care l-am descris în text. Cealaltă problemă este aceea că, în mod categoric, lumina se reflectă pe suprafața unui lac, care nu prezintă suprafață secundară. Deci lumina *trebuie* să se reflecte pe suprafața superioară. În cazul suprafețelor singulare, Newton a afirmat că lumina ar avea o predispoziție să se reflecte. Putem oare avea o teorie în care lumina să știe pe ce fel de suprafață cade, și dacă aceasta este sau nu singura?
Newton nu a insistat asupra acestor dificultăți legate de teoria sa privitoare la „toanele de a se reflecta și de a se transmite", deși este limpede că știa că aceasta nu era satisfăcătoare. Pe vremea lui, dificultățile legate de o teorie erau rapid expediate și trecute cu vederea – un stil diferit de cel cu care suntem obișnuiți în știința de astăzi, în care noi scoatem în evidență locurile din teoriile noastre care nu se potrivesc cu observațiile experimentale. Nu caut să iau atitudine împotriva lui Newton; vreau doar să mă pronunț în favoarea modului în care comunicăm între noi în știința actuală.

undelor,[3] însă, în momentul în care au fost efectuate experimente cu lumină foarte slabă căzând pe fotomultiplicatori, teoria undelor s-a năruit: pe măsură ce lumina se tot diminua, fotomultiplicatorii continuau să producă clicuri la fel de tari - doar că mai puține. Lumina se comporta ca particulă.

Actualmente, situația este că nu avem la dispoziție un model viabil care să explice reflexia parțială pe două suprafețe: calculăm doar probabilitatea ca un fotomultiplicator oarecare să fie lovit de un foton reflectat de către o lamă de sticlă. Am ales acest calcul drept primul nostru exemplu cu privire la metoda oferită de teoria electrodinamicii cuantice. Vă voi arăta „cum numărăm noi boabele" - ce fac fizicienii pentru a obține răspunsul corect. Nu vă voi explica în ce mod se „decide" propriu-zis fotonul dacă să ricoşeze, sau să treacă mai departe; acest lucru nu este cunoscut. (Poate că întrebarea nu are sens.) Vă voi arăta doar cum să calculați *probabilitatea* corectă ca lumina să se reflecte pe sticla de o anumită grosime, căci acesta este singurul lucru pe care fizicienii ştiu să-l facă! Ceea ce facem pentru a obține răspunsul la *această* problemă este analog cu lucrurile pe care trebuie să le facem pentru a obține răspunsul la *orice* chestiune explicată prin intermediul electrodinamicii cuantice.

Pentru aceasta, țineți-vă bine - nu că ar fi greu de înțeles, dar este absolut ridicol - tot ce avem de făcut este să desenăm mici săgeți pe o foaie de hârtie; asta-i tot!

Acuma, ce legătură să aibă o săgeată cu şansa de a se întâmpla un anumit eveniment? Potrivit regulilor „după care numărăm boabele",

---

[3] Această idee făcea uz de faptul că undele pot conlucra sau se pot contracara reciproc, iar calculele bazate pe acest model concordau cu rezultatele experimentelor lui Newton, cum concordau de altfel şi cu cele ale tuturor experimentelor efectuate vreme de sute de ani după el. Însă, în momentul în care au fost puse la punct aparate suficient de sensibile pentru a detecta un singur foton, teoria undelor prezicea că „păcăniturile" fotomultiplicatorului urmau să devină din ce în ce mai slabe, când, de fapt, ele îşi mențineau tăria - doar că se produceau din ce în ce mai rar. Nici un model rezonabil nu putea explica acest lucru, aşa încât a existat o vreme în care trebuia să fii isteț: trebuia să ştii ce experiment anume analizezi, ca să spui dacă lumina este undă sau particulă. Această stare de lucruri a fost denumită „dualismul undă-corpuscul" al luminii, iar cineva a afirmat în derâdere că lunea, miercurea şi vinerea lumina era undă, marțea, joia şi sâmbăta era particulă, iar duminica mai rămânea de văzut! Scopul acestor prelegeri este tocmai acela de a vă relata modul în care a fost „rezolvată" în cele din urmă această încurcătură.

probabilitatea unui eveniment este egală cu pătratul lungimii săgeții. De exemplu, în primul nostru experiment (atunci când am măsurat reflexia parțială numai pe suprafața superioară), probabilitatea ca un foton să ajungă la fotomultiplicatorul din punctul A era 4%. Aceasta corespunde unei săgeți a cărei lungime este 0,2, deoarece 0,2 ridicat la pătrat ne dă 0,04 (a se vedea Figura 6).

În al doilea experiment al nostru (atunci când înlocuiam lame mai subțiri de sticlă cu altele ceva mai groase), fotonii ajungeau în punctul A ricoşând fie de suprafața superioară, fie de cea inferioară. Cum să desenăm o săgeată care să corespundă acestei situații? Lungimea săgeții trebuie să aibă valori în domeniul de la zero la 0,4, pentru a reprezenta probabilitățile cuprinse între zero şi 16%, în funcție de grosimea sticlei (a se vedea Figura 7).

Începem prin a considera diferitele moduri în care un foton ar putea ajunge de la sursă la fotomultiplicatorul din punctul A. Din moment ce consider simplificarea că lumina ricoşează fie de suprafața superioară, fie de cea inferioară, există două drumuri posibile pe care fotonul poate ajunge în punctul A. Ceea ce facem în acest caz este să desenăm *două* săgeți - câte una pentru fiecare mod în care se poate întâmpla evenimentul - şi apoi să le combinăm într-o „săgeată finală", al cărei pătrat să reprezinte probabilitatea evenimentului. Dacă ar fi existat trei moduri diferite în care s-ar fi putut întâmpla evenimentul, am fi desenat trei săgeți separate, după care le-am fi combinat.

Dați-mi voie să vă arăt acum cum combinăm săgețile. Să zicem că vrem să combinăm săgeata x cu săgeata y (a se vedea Figura 8). Tot ce avem de făcut este să potrivim vârful lui x în dreptul cozii lui y (fără a schimba orientarea vreuneia din ele) şi să desenăm săgeata finală, dinspre coada lui x către vârful lui y. Asta-i tot. În aceeaşi manieră putem combina oricâte săgeți (tehnic, se numeşte „adunare vectorială"). Fiecare săgeată vă spune cât de departe şi în ce direcție să vă deplasați pe ocolite. Săgeata finală vă arată cum să ajungeți în acelaşi loc dintr-o *singură* mişcare (a se vedea Figura 9).

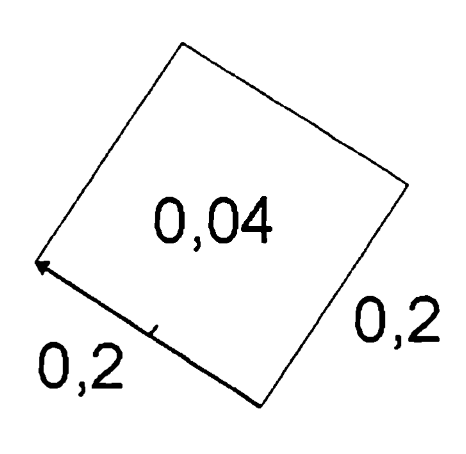


Figura 6. Caracteristica ciudată a reflexiei parțiale pe două suprafețe, i-a forțat pe fizicieni să renunțe la a face predicții absolute, în favoarea calculării numai a unei probabilități a evenimentului. Electrodinamica cuantică pune la dispoziție o metodă pentru a face aceasta - desenarea de mici săgeți pe o foaie de hârtie. Probabilitatea unui eveniment este reprezentată de aria pătratului având ca latură săgeata. De exemplu, o săgeată reprezentând o probabilitate de 0,04 (4%) are o lungime de 0,2.

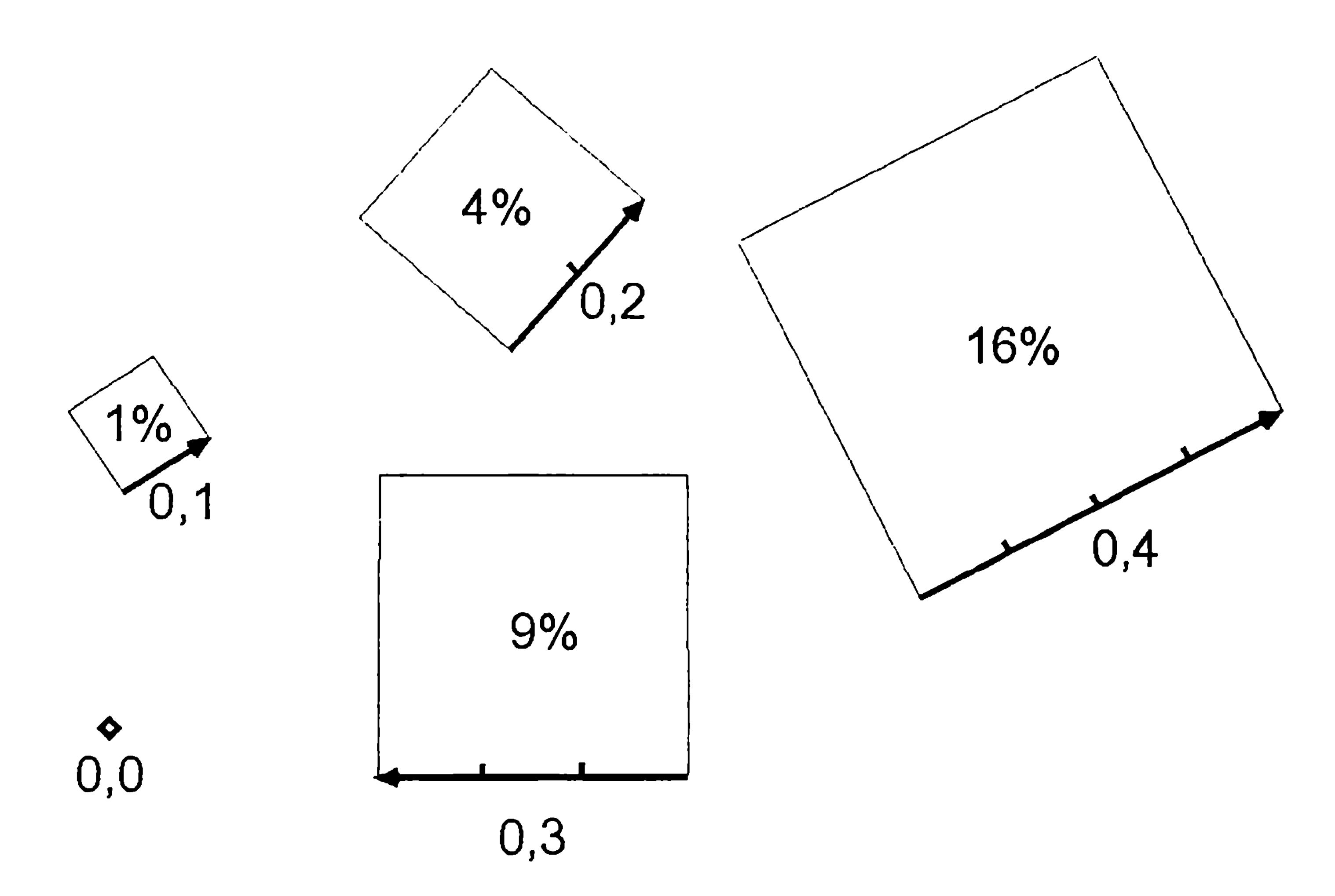


Figura 7. Săgețile reprezentând probabilități de la 0% la 16%, au lungimi între 0 și 0,4.

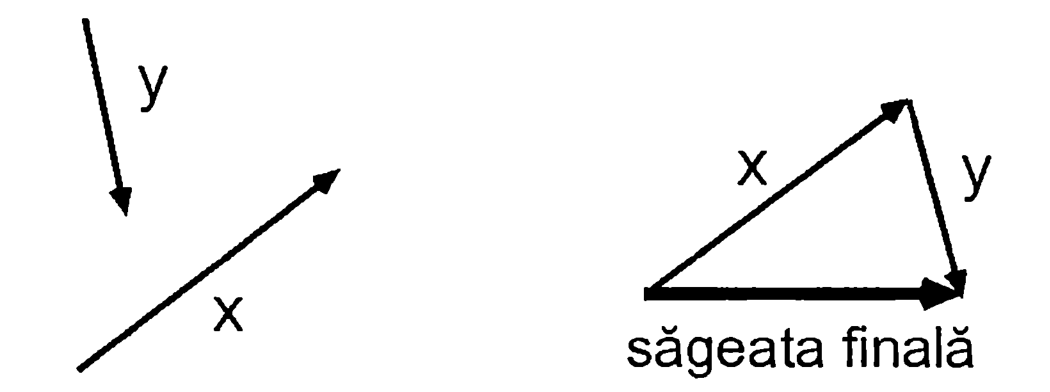


Figura 8. Săgețile care reprezintă fiecare manieră posibilă în care se poate întâmpla un eveniment, se desenează și apoi se combină („se sumează") în maniera care urmează: se atașează capătul unei săgeți de coada celeilalte - fără a se modifica direcția vreuneia din ele - și se desenează o „săgeată finală", dinspre coada primei săgeți către vârful celei de-a doua.

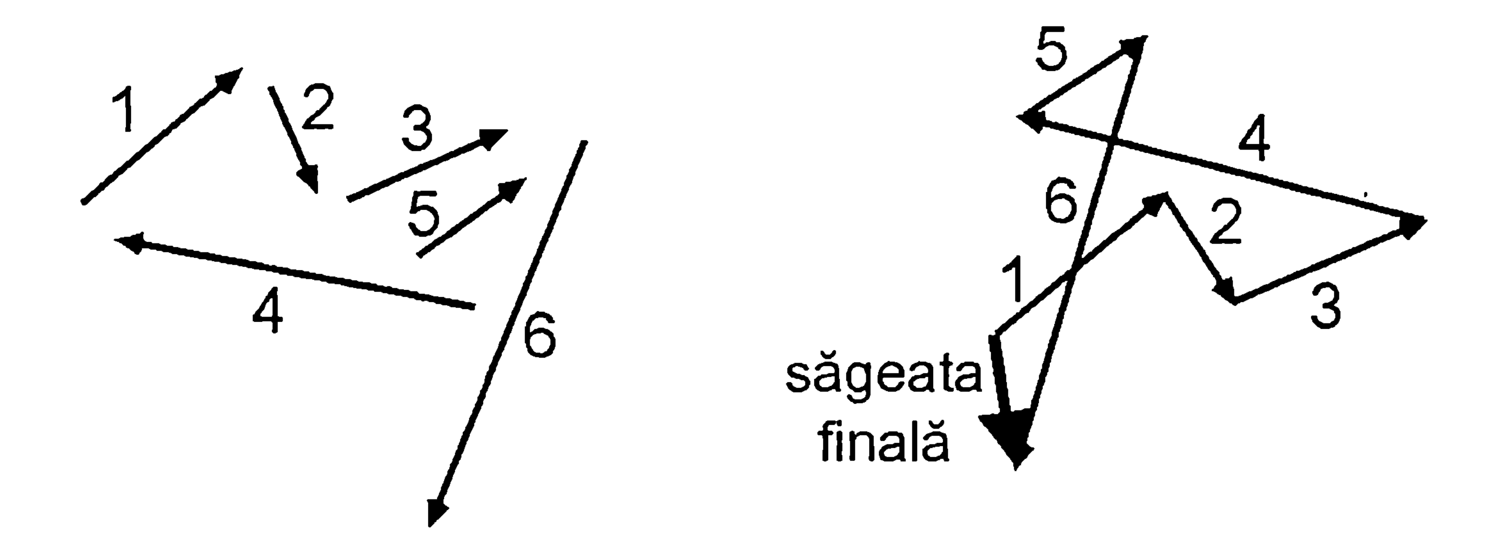


Figura 9. Utilizând maniera descrisă în Figura 8, se pot aduna oricâte săgeți.

Acuma, care anume sunt regulile concrete ce determină lungimea şi direcţia fiecărei săgeţi care, prin adunare, dau săgeata finală? În cazul de faţă, noi vom combina două săgeţi: una reprezentând reflexia pe faţa *superioară* a sticlei şi una reprezentând reflexia pe faţa *inferioară*.

Mai întâi, să luăm în discuţie lungimea. Aşa cum am văzut în cadrul primului experiment (atunci când am plasat fotomultiplicatorul în interiorul sticlei), suprafaţa superioară reflectă 4% din fotonii ce cad pe ea. Aceasta înseamnă că săgeata „reflexiei superioare" are lungimea 0,2. Suprafaţa inferioară reflectă tot 4%, deci săgeata „reflexiei inferioare" are de asemenea lungimea 0,2.

Pentru a determina direcţia fiecărei săgeţi, haideţi să ne imaginăm că avem un cronometru care poate măsura timpul cât se mişcă fotonul. Acest cronometru imaginar are un singur ac, care se roteşte foarte, foarte rapid. Atunci când un foton părăseşte sursa, pornim cronometrul. Atâta vreme cât fotonul se deplasează, acul cronometrului se învârteşte (pentru lumina roşie, de aproximativ 14.000 de ori pentru fiecare centimetru parcurs); atunci când fotonul ajunge la fotomultiplicator, oprim cronometrul. Acul acestuia sfârşeşte arătând într-o anumită direcţie. Aceea este direcţia pe care desenăm săgeata.

Ne mai trebuie o singură regulă pentru a calcula corect răspunsul: atunci când considerăm parcursul unui foton care ricoşează de faţa *superioară* a sticlei, sensul săgeţii se inversează. Cu alte cuvinte, în vreme ce săgeata reflexiei *inferioare* se desenează în *aceeaşi* direcţie cu acul cronometrului, săgeata reflexiei *superioare* se desenează în direcţie *opusă* acului cronometrului.

Haideţi să desenăm acum săgeţile pentru cazul luminii care se reflectă pe un strat de sticlă extrem de subţire. Pentru a desena săgeata reflexiei superioare, să ne imaginăm un foton care părăseşte sursa de lumină (acul cronometrului începe să se învârtească), ricoşează de faţa superioară, şi ajunge în punctul A (acul cronometrului se opreşte). Desenăm o mică săgeată de lungime 0,2 în direcţie opusă celei a acului cronometrului (a se vedea Figura 10).

Pentru a desena săgeata reflexiei inferioare, să ne imaginăm un foton care părăseşte sursa de lumină (acul cronometrului începe să se învârtească), trece prin faţa superioară, ricoşează de faţa inferioară, şi ajunge în punctul A (acul cronometrului se opreşte). De această dată, acul cronometrului este îndreptat aproape în aceeaşi direcţie, deoarece unui foton care ricoşează de faţa inferioară a sticlei îi ia doar un pic mai mult timp să ajungă în punctul A – el parcurge de două ori stratul de sticlă extrem de subţire. Desenăm acum o mică săgeată de lungime 0,2 în direcţia arătată de acul cronometrului (a se vedea Figura 11).

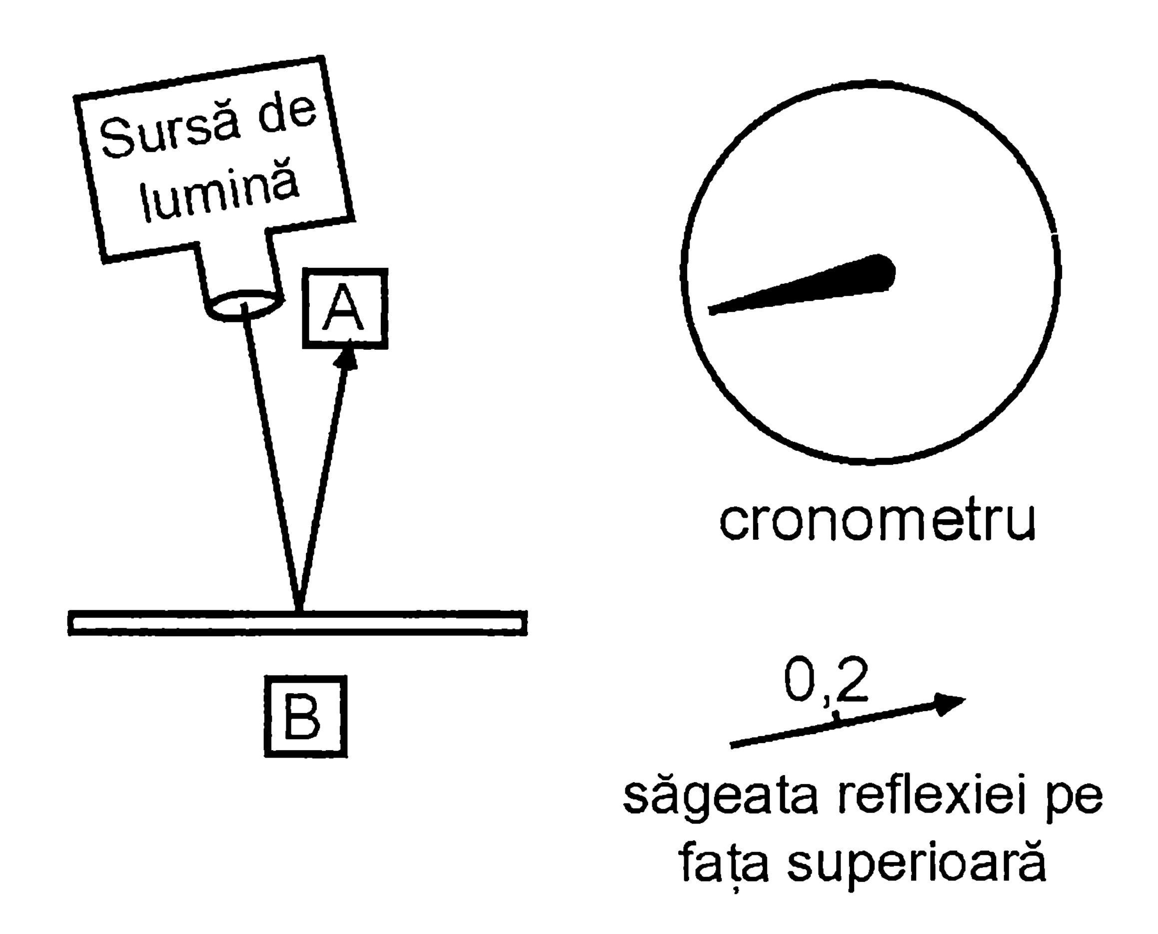


Figura 10. În cadrul unui experiment pentru măsurarea reflexiei parțiale pe o lamă de sticlă, putem afirma că un foton singular poate ajunge în punctul A în două feluri: de la suprafața superioară, sau de la suprafața inferioară. Se desenează câte o săgeată cu lungimea 0,2 pentru fiecare din cazuri, direcțiile acestora determinându-se prin intermediul acului unui „cronometru" ce măsoară timpul cât se deplasează fotonul. Săgeata „reflexiei superioare" se desenează în sens opus direcției în care s-a oprit acul.

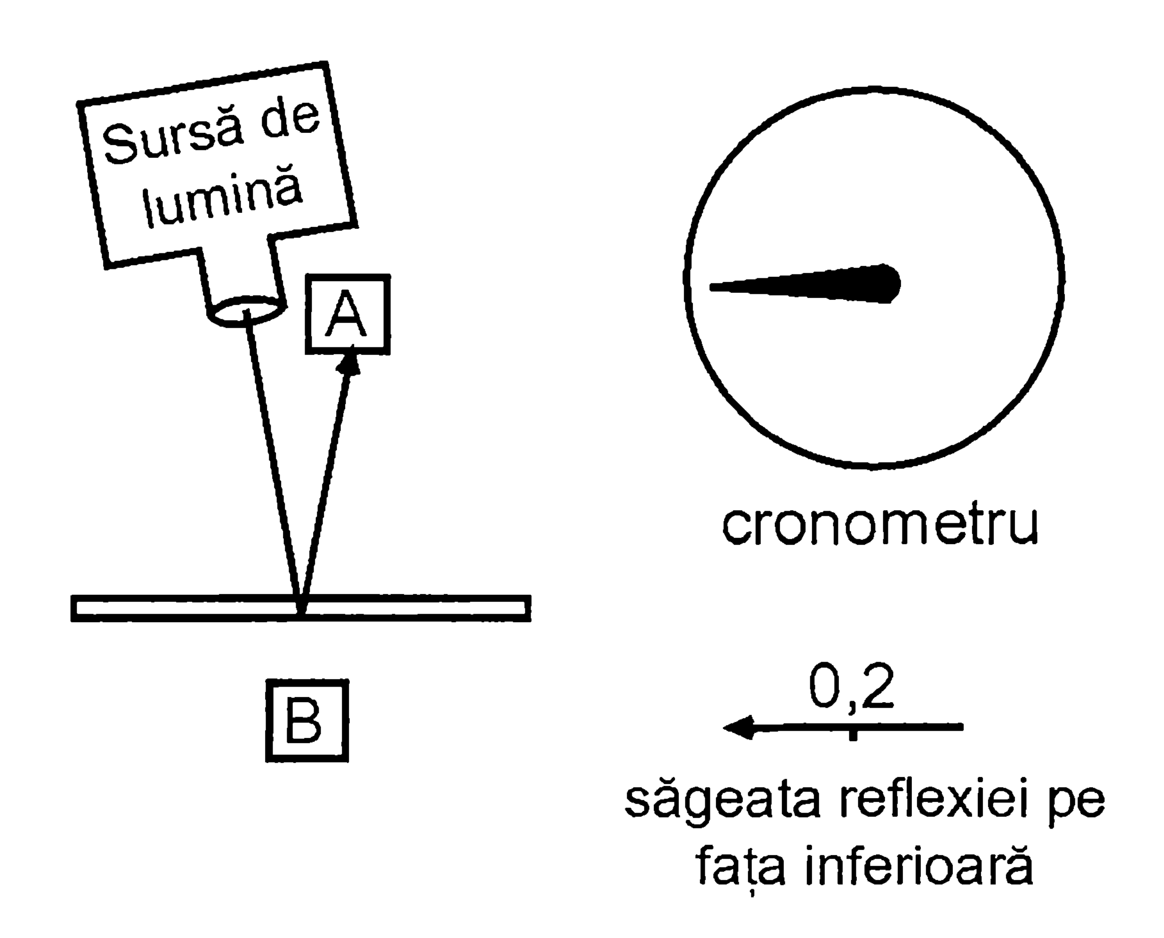


Figura 11. Unui foton care ricoşează de suprafața inferioară a unui strat subțire de sticlă, îi ia un pic mai mult timp să ajungă în punctul A. Astfel, acul cronometrului se opreşte pe o direcție uşor diferită de cea în care s-a oprit atunci când a măsurat timpul necesar fotonului reflectat de fața superioară. Săgeata „reflexiei inferioare" se desenează în aceeaşi direcție cu acul cronometrului.

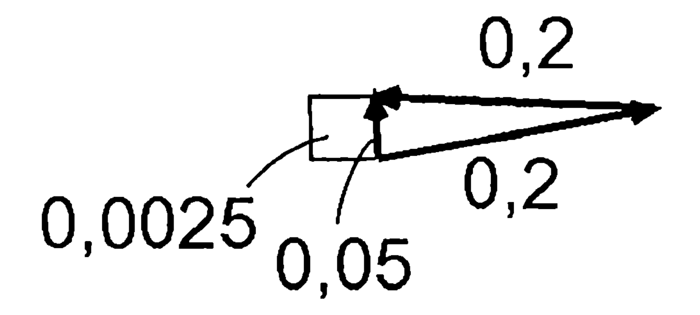


Figura 12. Săgeata finală, al cărei pătrat reprezintă probabilitatea de reflexie pe o lamă de sticlă extrem de subțire, se desenează ca suma dintre săgeata reflexiei superioare și săgeata reflexiei inferioare. Rezultatul este aproape zero.

Haideți acum să combinăm cele două săgeți. Din moment ce ele au aceeași lungime dar indică direcții aproape opuse, săgeata finală are o lungime aproape nulă, iar pătratul ei este încă și mai aproape de zero. Astfel, probabilitatea ca lumina să se reflecte pe un strat de sticlă infinitezimal este practic zero (a se vedea Figura 12).

Atunci când înlocuim cel mai subțire strat de sticlă cu unul un pic mai gros, fotonului care ricoșează de suprafața inferioară îi ia un pic mai mult timp să ajungă în punctul A; ca atare, acul cronometrului se mai rotește un pic înainte de a se opri, iar săgeata reflexiei inferioare sfârșește sub un unghi ceva mai mare în raport cu săgeata reflexiei superioare. Săgeata finală este un pic mai lungă și, corespunzător, pătratul ei este mai mare (a se vedea Figura 13).

Ca un alt exemplu, haideți să urmărim cazul în care sticla este exact atât de groasă cât să avem o jumătate de rotație în plus a acului cronometrului, atunci când se măsoară durata mișcării unui foton ce ricoșează de suprafața inferioară. De această dată, săgeata reflexiei inferioare sfârșește arătând exact în aceeași direcție ca săgeata reflexiei superioare. Atunci când combinăm cele două săgeți, obținem o săgeată finală a cărei lungime este 0,4 și al cărei pătrat este 0,16, aceasta însemnând o probabilitate de 16% (a se vedea Figura 14).

Dacă mărim grosimea sticlei suficient de mult, astfel încât acul cronometrului ce măsoară durata drumului corespunzător suprafeței inferioare să facă exact o rotație *întreagă* în plus, cele două săgeți sfârșesc din nou prin a arăta în direcții opuse, iar săgeata finală este zero (a se vedea Figura 15). Această situație se petrece iar și iar, ori de câte ori grosimea sticlei este exact atât cât să permită încă o rotație completă a acului cronometrului ce măsoară timpul corespunzător reflexiei inferioare.

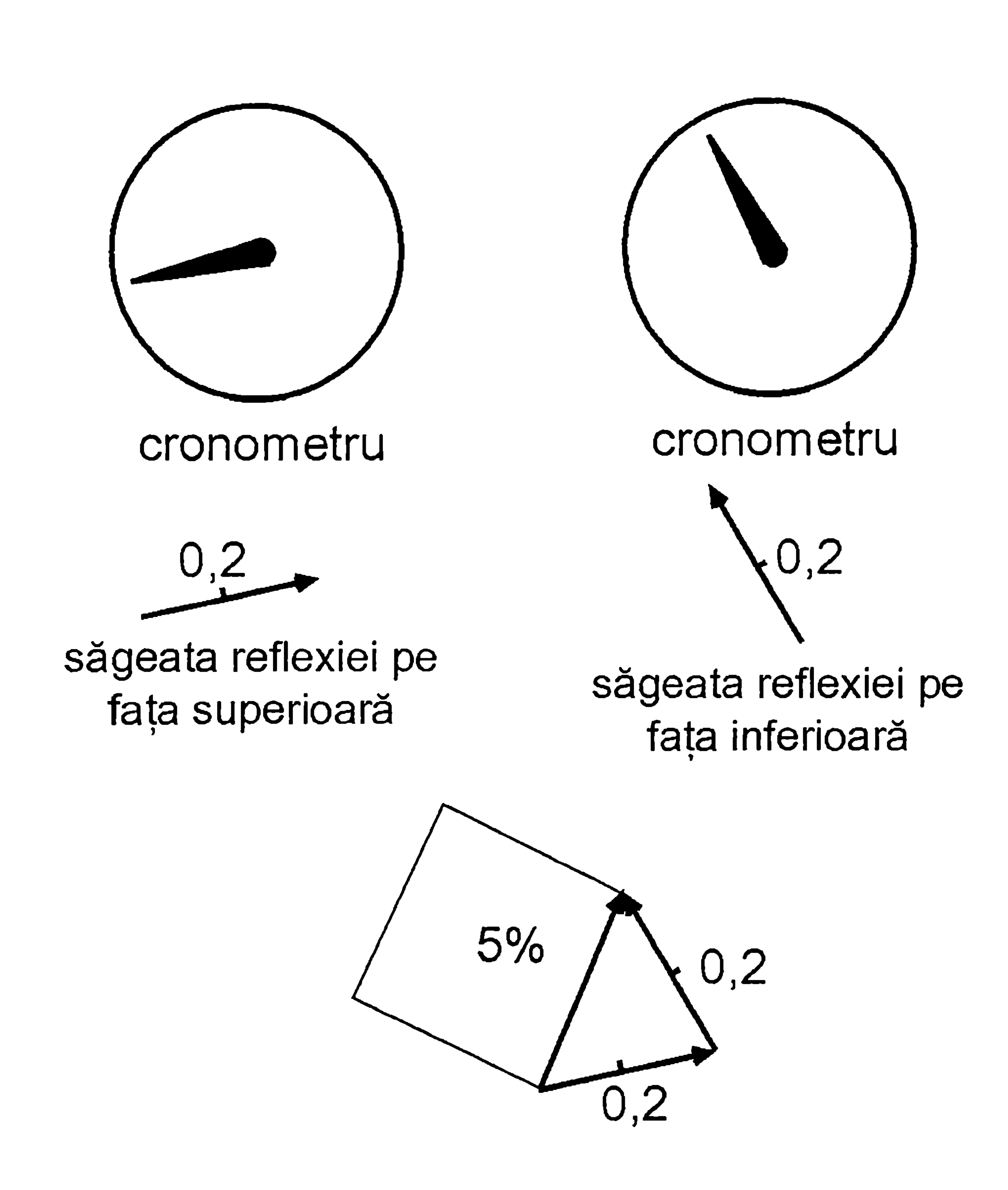


Figura 13. Săgeata finală pentru o lamă de sticlă un pic mai groasă este ceva mai lungă, din cauză că unghiul relativ dintre săgeţile corespunzătoare reflexiilor superioară şi inferioară este mai mare. Aceasta datorită faptului că, în comparaţie cu exemplul anterior, fotonului care ricoşează de faţa inferioară îi ia un pic mai mult timp să ajungă în punctul A.

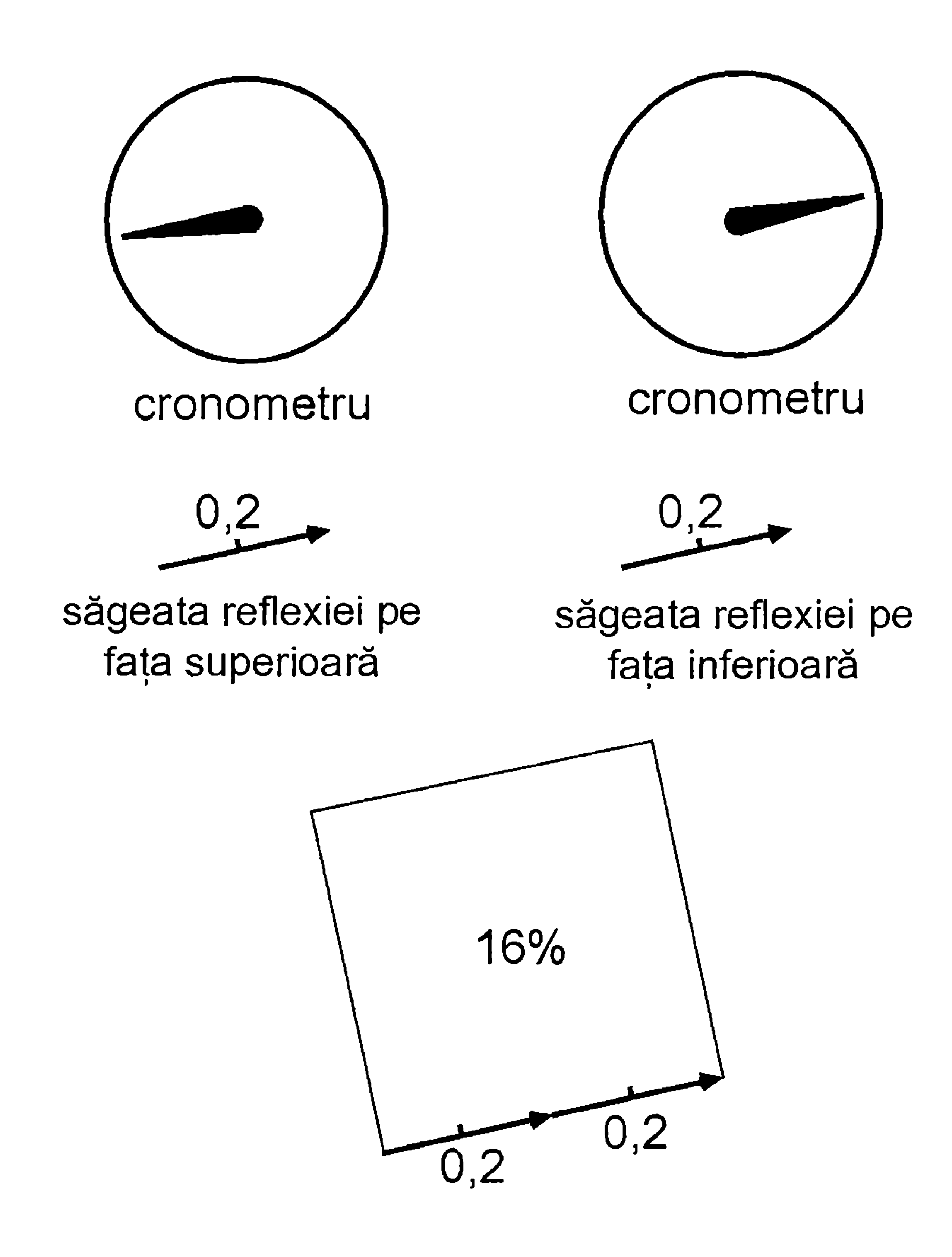


Figura 14. Atunci când stratul de sticlă este suficient de gros, exact cât să permită o jumătate de rotație în plus a acului cronometrului ce măsoară timpul pentru un foton reflectat de fața inferioară, săgețile reflexiilor superioară și inferioară sfârșesc prin a arăta în aceeași direcție. Rezultă o săgeată finală de lungime 0,4, ceea ce corespunde unei probabilități de 16%.

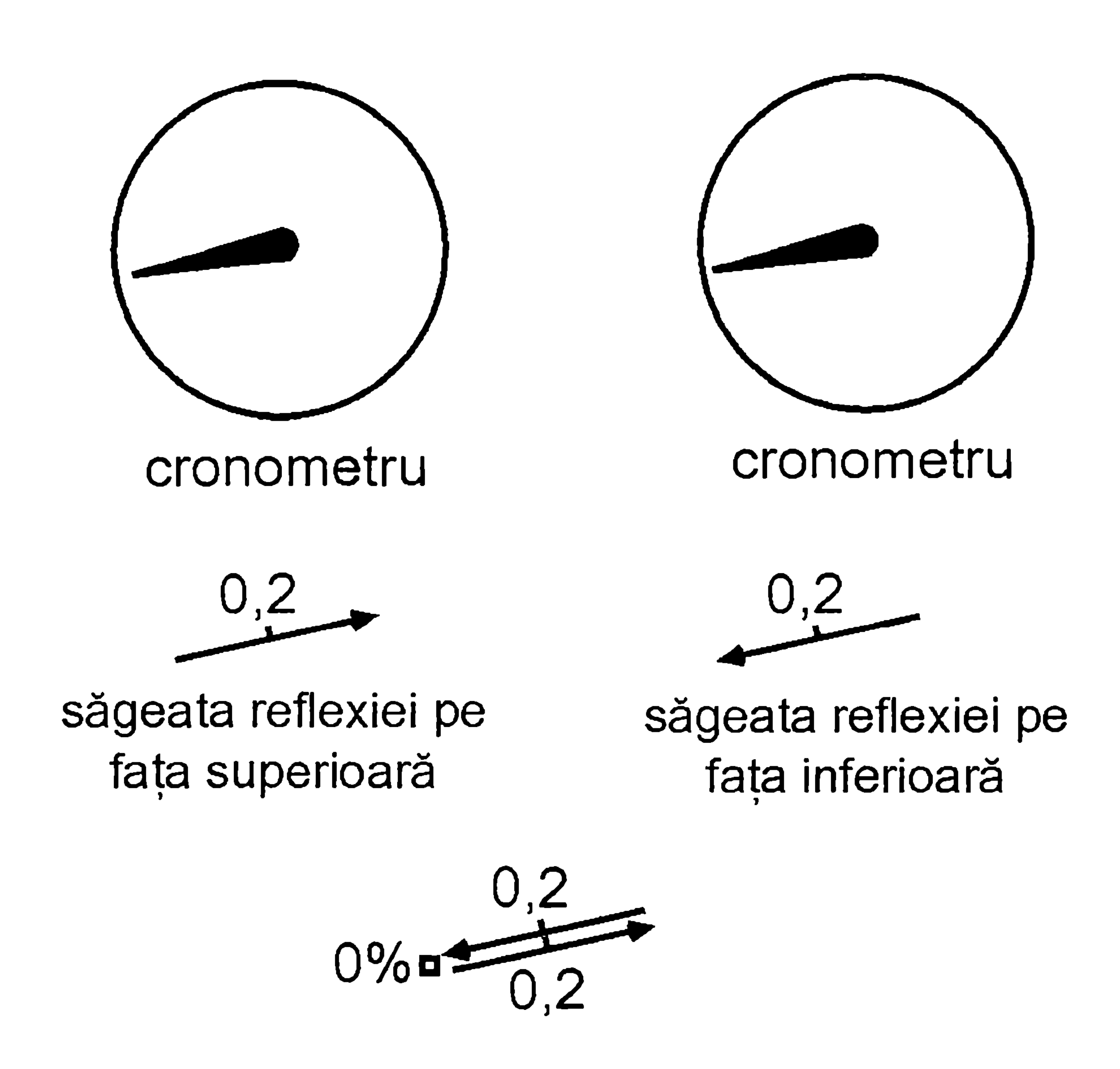


Figura 15. Atunci când lama de sticlă este exact de grosime potrivită pentru a permite una sau mai multe rotații întregi ale acului cronometrului care măsoară timpul pentru un foton reflectat de suprafața inferioară, săgeata finală este din nou egală cu zero şi nu avem deloc reflexie.

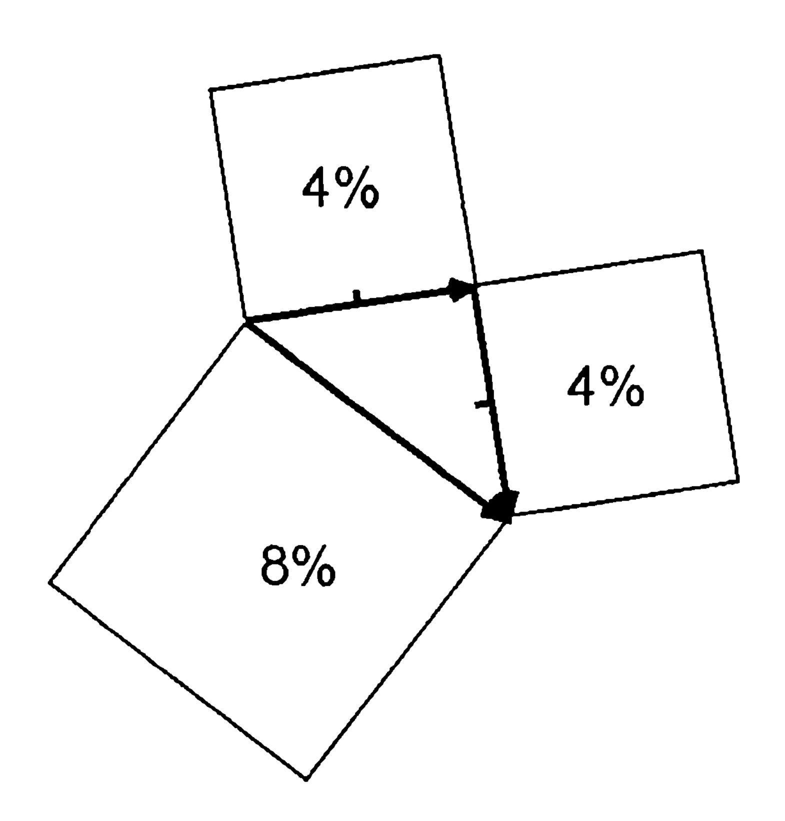


Figura 16. Atunci când săgețile reflexiilor superioară şi inferioară fac între ele un unghi de 90°, săgeata finală reprezintă ipotenuza unui triunghi dreptunghic. Astfel, pătratul ei este egal cu suma celorlalte două pătrate - 8%.

Dacă grosimea sticlei este exact atât cât acul cronometrului ce măsoară timpul corespunzător reflexiei inferioare să efectueze în plus 1/4 sau 3/4 dintr-o rotație, cele două săgeți vor sfârși pe direcții perpendiculare. În acest caz, săgeata finală va constitui ipotenuza unui triunghi dreptunghic și, potrivit Teoremei lui Pitagora, pătratul ipotenuzei este egal cu suma pătratelor catetelor. Iată acea valoare care era corectă „de două ori pe zi": 4% + 4% face 8% (a se vedea Figura 16).

Să observăm că, pe măsură ce mărim treptat grosimea sticlei, săgeata reflexiei superioare arată mereu în aceeași direcție, pe când săgeata reflexiei inferioare își modifică tot timpul direcția. Modificarea orientării unei săgeți în raport cu cealaltă, face ca lungimea săgeții finale să se repete ciclic, între valorile zero și 0,4; ca urmare, *pătratul* săgeții finale se repetă ciclic între zero și 16%, așa cum s-a observat în experimentul nostru (a se vedea Figura 17).

Tocmai v-am demonstrat cum se poate calcula cu exactitate această stranie trăsătură a reflexiei parțiale, desenând niște afurisite de săgetuțe pe o foaie de hârtie. Termenul tehnic pentru aceste săgeți este „amplitudinea probabilităților", și mă simt mai important atunci când spun „noi calculăm amplitudinea probabilității unui eveniment". Totuși, prefer să recunosc cinstit că ceea ce încercăm noi să găsim este săgeata al cărei pătrat reprezintă probabilitatea de a se întâmpla ceva.

Mai înainte de a încheia această prelegere, aș dori să vă vorbesc despre culorile pe care le observați pe baloanele de săpun. Sau, și mai cunoscut, atunci când automobilul dumneavoastră pierde ulei, dacă vă uitați la uleiul maroniu de la suprafața unei băltoace, observați niște culori superbe. Pelicula fină de ulei care plutește deasupra băltoacei acționează precum o lamă foarte subțire de sticlă – ea reflectă lumina de o culoare dată de la zero până la valoarea maximă, în funcție de grosime. Dacă asupra unei pelicule de ulei proiectăm o lumină roșie pură, observăm niște regiuni luminate în roșu, separate prin benzi înguste întunecate (acolo unde nu se produce reflexie, din cauză că grosimea peliculei de ulei nu este aceeași peste tot). Dacă asupra peliculei proiectăm o lumină pură albastră, observăm niște regiuni luminate în albastru, separate prin benzi înguste întunecate. Dacă proiectăm ambele lumini, observăm zone care au exact grosimea potrivită pentru a reflecta puternic doar lumina roșie, și alte zone care au exact grosimea potrivită pentru a reflecta doar lumina albastră; alte zone, încă, au o grosime care reflectă puternic atât lumina roșie cât și lumina albastră (pe acestea dumneavoastră le

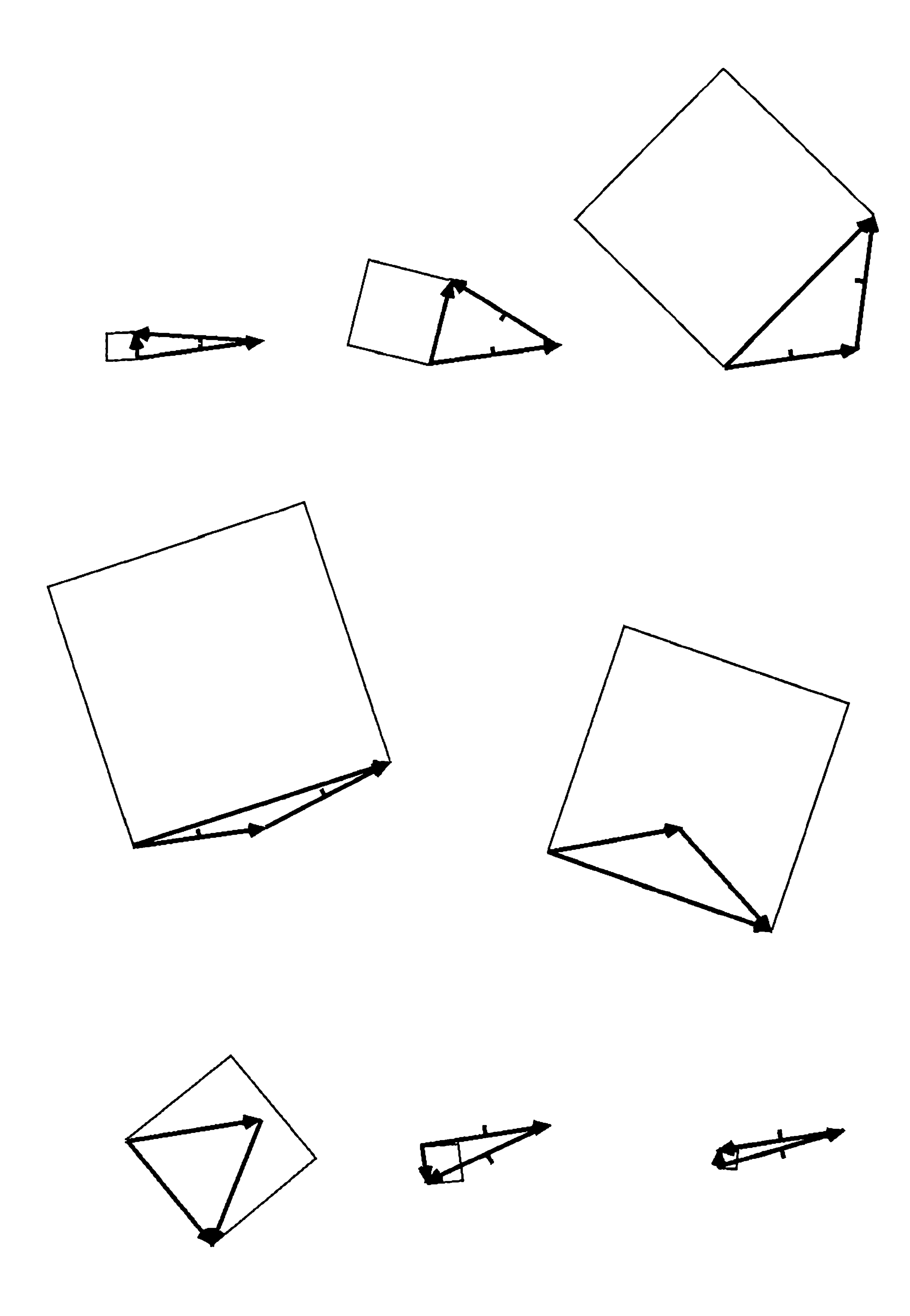


Figura 17. Pe măsură ce lamele subțiri de sticlă sunt înlocuite cu lame mai groase, acul cronometrului ce măsoară timpul corespunzător unui foton reflectat de suprafața inferioară, se rotește un pic mai mult, iar unghiul relativ dintre săgețile reflexiilor superioară și inferioară se schimbă. Aceasta face ca săgeata finală să-și modifice lungimea și ca valoarea pătratului ei să varieze de la zero la 16% și înapoi la zero, iar și iar.

vedeți ca fiind violet), în vreme ce altele, în fine, au exact grosimea necesară pentru a anula orice reflexie, şi apar ca negre.

Pentru a înțelege mai bine acest fenomen, trebuie să ştim faptul că ciclul de la zero la 16% al reflexiei parțiale pe două suprafețe, se repetă ceva mai rapid pentru lumina albastră decât pentru cea roşie. Ca urmare, pentru anumite grosimi, una, sau cealaltă, sau amândouă dintre culori sunt puternic reflectate, pe când pentru alte grosimi, reflexia ambelor culori se anulează (a se vedea Figura 18). Ciclurile reflexiei se repetă în ritmuri diferite, din cauză că acul cronometrului se roteşte mai repede atunci când măsoară timpul corespunzător unui foton albastru decât o face în situația unui foton roşu. În fapt, aceasta este *singura* diferență dintre un foton roşu şi unul albastru (sau unul de orice altă culoare, inclusiv unde radio, raze X, etc.) - viteza de rotație a acului cronometrului.

Atunci când proiectăm lumină roşie şi albastră asupra unei pelicule de ulei, apar diverse forme de culoare roşie sau albastră sau violet, separate între ele prin dungi negre. Atunci când asupra uleiului de la suprafața unei băltoace cade lumina Soarelui, care conține lumină roşie, galbenă, verde şi albastră, zonele care reflectă puternic fiecare din aceste culori se suprapun, producând tot felul de combinații pe care ochii noştri le percep drept culori diferite. Pe măsură ce pata de ulei se întinde şi se mişcă pe suprafața apei, modificându-şi grosimea în diverse locuri, tiparele colorate se schimbă continuu. (Pe de altă parte, dacă ați privi aceeaşi băltoacă noaptea, la lumina uneia din lămpile acelea de pe stradă cu vapori de sodiu, ați observa doar dungi gălbui separate de negru - este din cauză că acele becuri emit lumină doar de o singură culoare.

Acest fenomen, al culorilor produse prin reflexia parțială a luminii albe pe două suprafețe, se numeşte irizație, şi poate fi întâlnit în multe situații. Poate că v-ați întrebat cum iau naştere culorile vii ale păunilor şi păsărilor colibri. Acum ştiți. Modul în care au evoluat aceste culori vii este de asemenea o chestiune interesantă. Atunci când admirăm un păun, trebuie să admitem că meritul este al generațiilor întregi de păunițe cu culori şterse, care au fost pretențioase în alegerea masculilor. (Omul a intervenit abia mai târziu şi a canalizat procesul de selecție la păuni.)

În prelegerea următoare vă voi arăta modul în care, pe baza acestui proces absurd de combinare de mici săgeți, se pot calcula răspunsurile exacte pentru acele alte fenomene care vă sunt familiare:

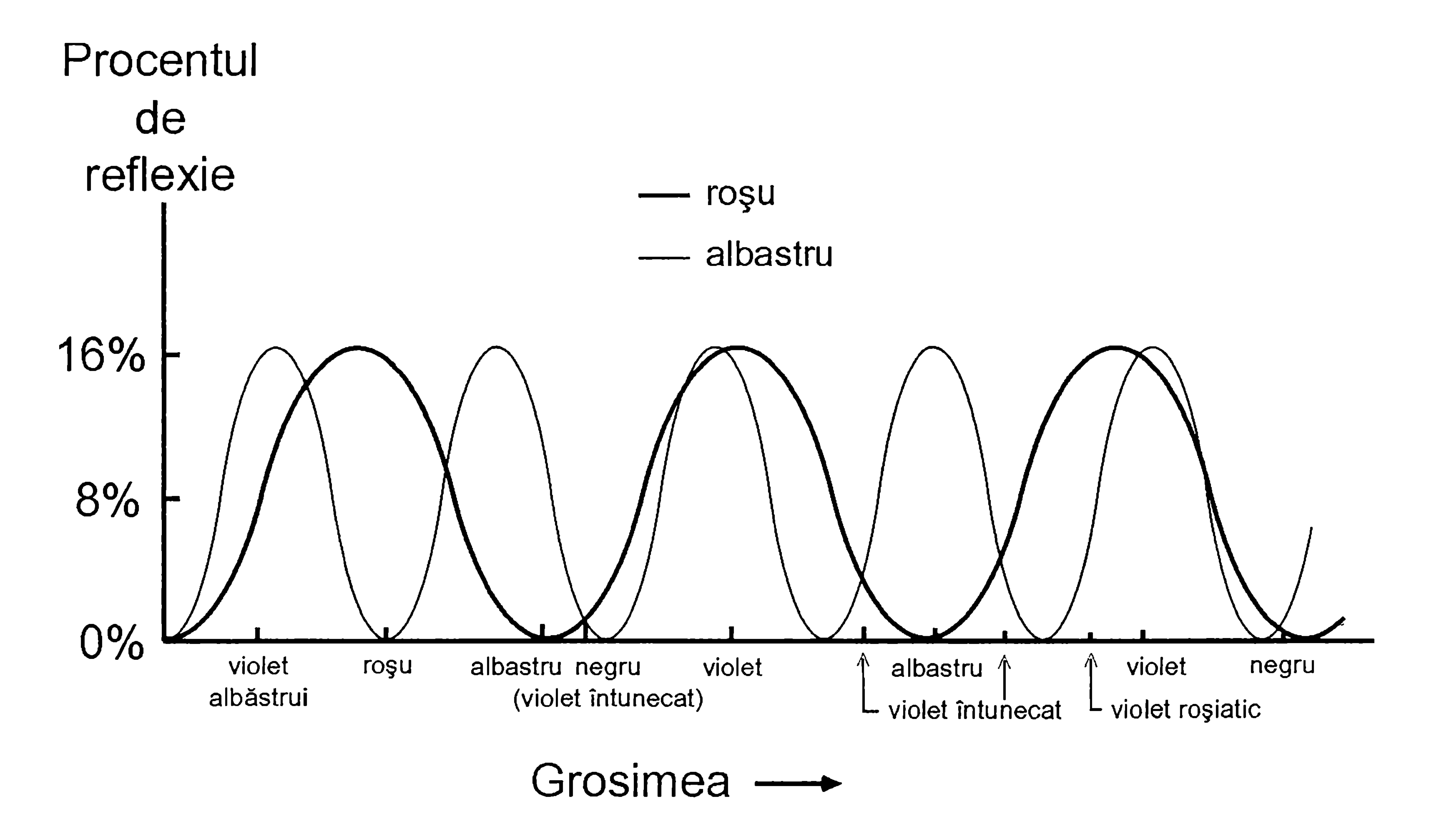
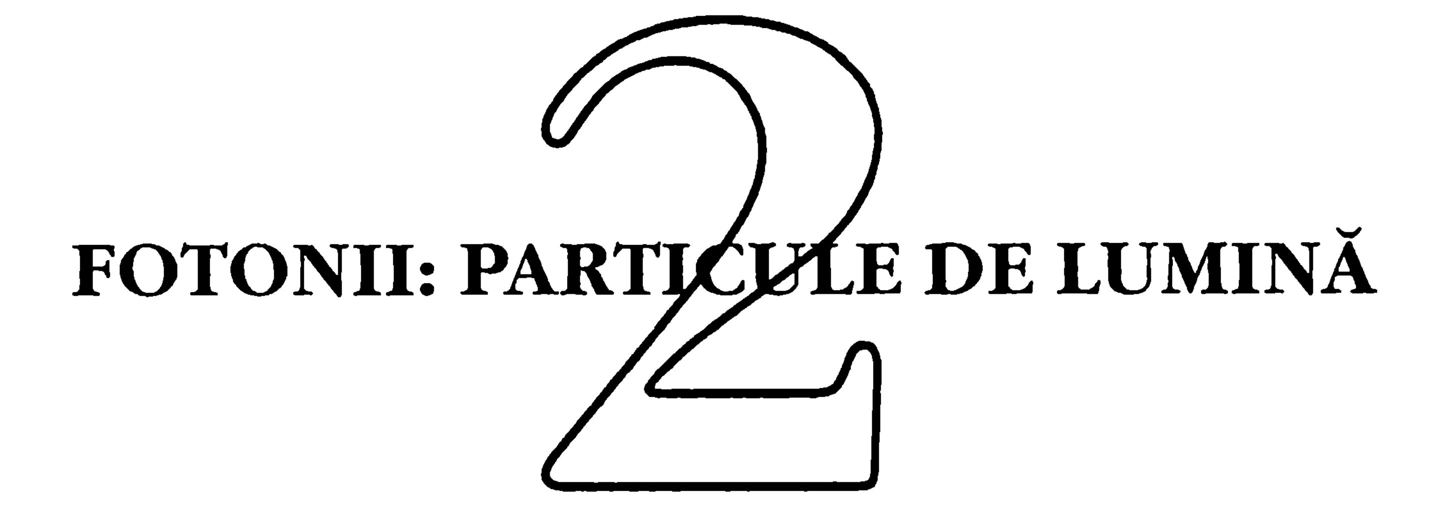


Figura 18. Pe măsură ce grosimea stratului creşte, cele două suprafeţe produc o reflexie parţială a luminii monocromatice, a cărei probabilitate fluctuează ciclic de la zero la 16%. Cum viteza de rotaţie a acului cronometrului imaginar este diferită pentru diferite culori ale luminii, ciclul se repetă în ritmuri diferite. Ca urmare, atunci când asupra stratului sunt proiectate două culori, cum ar fi roşul pur şi albastrul pur, o grosime dată va reflecta numai lumina roşie, sau numai pe cea albastră, sau pe amândouă în proporţii diferite (ceea ce va produce diferite nuanţe de violet), sau pe niciuna (negru). Dacă stratul are grosime variabilă, aşa ca în cazul unei picături de ulei întinse pe suprafaţa unei băltoace, vor fi vizibile toate variantele. În lumină naturală, care constă din toate culorile, se vor produce tot felul de combinaţii, acestea dând naştere unei multitudini de nuanţe.

faptul că lumina se propagă în linie dreaptă, faptul că ea se reflectă pe suprafața unei oglinzi sub același unghi sub care cade („unghiul de incidență este egal cu unghiul de reflexie"), faptul că o lentilă focalizează lumina, și așa mai departe. Acest nou cadru conceptual va descrie tot ceea ce cunoașteți în legătură cu lumina.



2 FOTONII: PARTICULE DE LUMINĂ

Aceasta este a doua prelegere dintr-o serie dedicată electrodinamicii cuantice. Întrucât este evident că niciunul dintre dumneavoastră nu a fost prezent la prima prelegere (le-am spus respectivilor că nu vor înțelege nimic), voi rezuma în câteva cuvinte despre ce a fost vorba în ea.

Am vorbit despre lumină. Prima trăsătură importantă în legătură cu lumina este aceea că, atunci când lumina monocromatică (de o singură culoare) foarte slabă lovește un detector, se dovedește că ea este alcătuită din particule. Detectorul produce clicuri de tărie egală, din ce în ce mai rare, pe măsură ce lumina devine din ce în ce mai slabă.

Cealaltă trăsătură importantă a luminii, pe care am discutat-o în prima prelegere, este reflexia parțială a luminii monocromatice. Din fotonii care lovesc o suprafață *singulară* de sticlă, se reflectă în medie 4%. Aceasta constituie din start un mister profund, căci este imposibil de prezis care fotoni vor ricoșa și care vor trece dincolo. Cu o *a doua* suprafață, rezultatele devin încă și mai stranii: în locul așteptatului procent de reflexie de 8%, reflexia parțială poate fi amplificată până la nu mai puțin de 16%, sau poate fi stopată, în funcție de grosimea sticlei.

Pentru lumina intensă, acest ciudat fenomen care este reflexia parțială pe două suprafețe, poate fi explicat printr-o teorie ondulatorie. Dar teoria undelor nu poate explica modul în care detectorul produce clicuri de tărie egală atunci când lumina devine din ce în ce mai slabă. Electrodinamica cuantică „rezolvă“ această dualitate undă-corpuscul, afirmând că lumina este compusă din particule (așa cum a crezut Newton la început). Însă prețul acestui mare pas înainte al științei, este retragerea fizicii pe pozițiile pe care ea este în măsură să calculeze doar *probabilitatea* ca un foton să lovească detectorul, fără a oferi un model ca lumea pentru maniera efectivă în care se întâmplă aceasta.

În prima prelegere am descris modul în care fizicienii calculează probabilitatea ca un anumit eveniment să se petreacă. Ei desenează nişte săgeți pe hârtie, potrivit regulilor care urmează.

PRINCIPIU FUNDAMENTAL: Probabilitatea unui eveniment este egală cu pătratul lungimii unei săgeți, numite „amplitudinea probabilității". De exemplu, o săgeată cu lungimea egală cu 0,4, reprezintă o probabilitate de 0,16, sau 16%.

REGULĂ GENERALĂ de desenare a săgeților, în cazul în care un eveniment se poate petrece în moduri alternative: Se desenează câte o săgeată pentru fiecare mod în parte, după care cele două săgeți se compun (se „adună") plasând vârful uneia din ele în coada celeilalte. Apoi se desenează „săgeata finală", unind coada primei săgeți cu vârful ultimei. Pătratul săgeții finale dă probabilitatea întregului eveniment.

Am mai menționat, de asemenea, anumite reguli concrete de desenare a săgeților în cazul reflexiei parțiale pe sticlă (le puteți găsi la pagina 36).

Toate cele de mai sus constituie un rezumat al primei prelegeri.

Ceea ce aş dori acum, este să vă prezint maniera în care acest model al lumii, atât de diferit de orice ați văzut până în clipa de față (încât sperați, poate, să nu-l mai vedeți niciodată), este capabil să explice toate proprietățile simple pe care le cunoaştem în legătură cu lumina. Mă refer aici la faptul că, atunci când lumina se reflectă pe o oglindă, unghiul de incidență este egal cu unghiul de reflexie; că razele de lumină se frâng la trecerea ei din aer în apă; că lumina se propagă în linie dreaptă; că lentilele focalizează lumina, şi aşa mai departe. Teoria descrie, de asemenea, multe alte proprietăți ale luminii, care probabil că nu vă sunt familiare. În fapt, cea mai mare dificultate pe care am întâmpinat-o la redactarea acestor prelegeri, a fost cea de a rezista tentației de a deduce toate acele lucruri referitoare la lumină, pe care v-ați muncit atâta timp să le învățați pe vremea şcolii. Este vorba, de pildă, de modul în care lumina trece dincolo de muchia unui obstacol, formând umbra (fenomenul se numeşte difracție). Însă, cum cei mai mulți dintre dumneavoastră nu au urmărit cu îndeamănuntul astfel de fenomene, nu mă voi sinchisi prea mult de ele. Totuşi, vă pot garanta că *toate* fenomenele referitoare la lumină care au fost observate

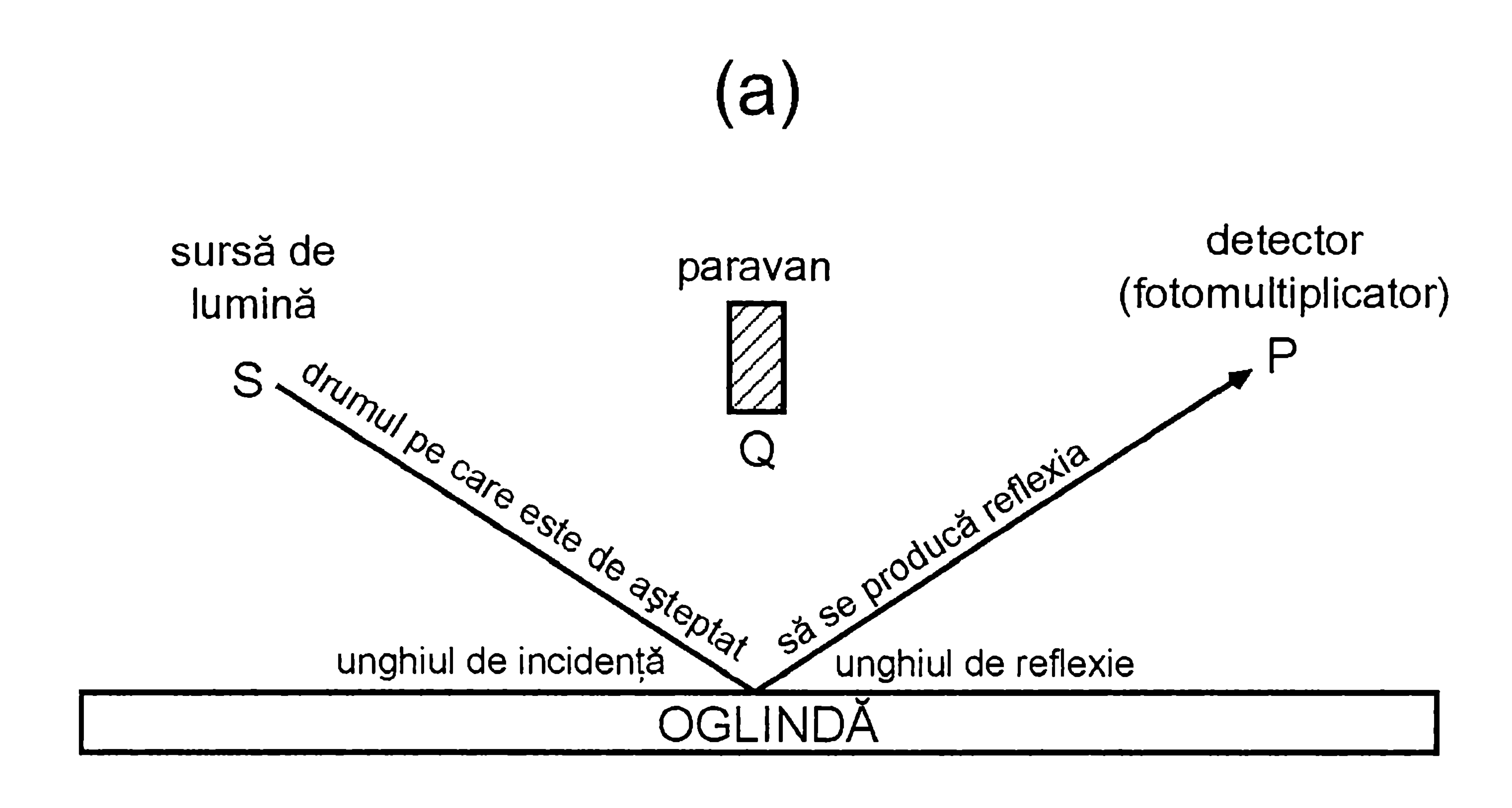
în detaliu, pot fi explicate de teoria electrodinamicii cuantice. (Altfel, exemplele pe care vi le voi da, şi care descriu doar fenomenele cele mai simple şi mai obişnuite, ar putea să vă lase o impresie greşită.)

Să începem cu problema determinării modului în care lumina se reflectă pe o oglindă (a se vedea Figura 19). În punctul S dispunem de o sursă ce emite lumină de o singură culoare şi cu intensitate foarte slabă (haideți să folosim din nou lumină roşie). Sursa emite câte un foton o dată. În punctul P aşezăm un fotomultiplicator, pentru a detecta fotonii. Haideți să-l punem la aceeaşi înălțime cu sursa - atunci când totul este simetric, este mai uşor de desenat săgețile. Dorim să calculăm şansa ca detectorul să producă un clic după ce sursa va fi emis un foton. Din moment ce este posibil ca fotonul să o ia drept spre detector, haideți să plasăm un paravan Q, care să împiedice acest lucru.

Acuma, ne-am aştepta ca toată lumina care ajunge la detector, să se reflecte în partea de mijloc a oglinzii, pentru că acela este locul în care unghiul de incidență este egal cu unghiul de reflexie. Şi ne-ar părea cât se poate de evident ca părțile oglinzii dinspre cele două capete să aibă de-a face tot atât de mult cu reflexia, ca baba cu mitraliera, este?

Deşi ați putea *crede* că părțile dinspre capete ale oglinzii nu au nicio legătură cu reflexia luminii care se propagă de la sursă la detector, haideți să vedem ce are de spus teoria cuantică în această privință. Regulă: probabilitatea petrecerii unui eveniment anume este egală cu pătratul săgeții finale obținute prin desenarea câte unei săgetuțe pentru fiecare din modurile în care evenimentul s-ar putea întâmpla, şi prin compunerea („adunarea") acestora. În experimentul în care se măsura reflexia parțială a luminii pe două suprafețe, existau două moduri în care un foton putea ajunge de la sursă la detector. În acest experiment, există milioane de feluri în care s-ar putea deplasa fotonul: ar putea ajunge în partea stângă a oglinzii, în punctele A sau B (de pildă), şi de acolo la detector (a se vedea Figura 20); sau ar putea ricoşa în punctul G, acolo unde vă aşteptați dumneavoastră; ori ar putea coborî în partea dreaptă a oglinzii, în punctele K sau M, şi de acolo să urce spre detector. Ați putea crede că sunt nebun, deoarece la majoritatea modurilor în care v-am spus că s-ar putea reflecta fotonul pe oglindă, unghiurile nu sunt egale. Dar *nu* sunt nebun, căci lumina chiar se propagă astfel! Cum să fie posibil aşa ceva?

Pentru a face această problemă mai uşor de înțeles, haideți să presupunem că oglinda constă doar dintr-o fâşie lungă, de la stânga la dreapta - putem foarte bine, pentru moment, să uităm că oglinda iese



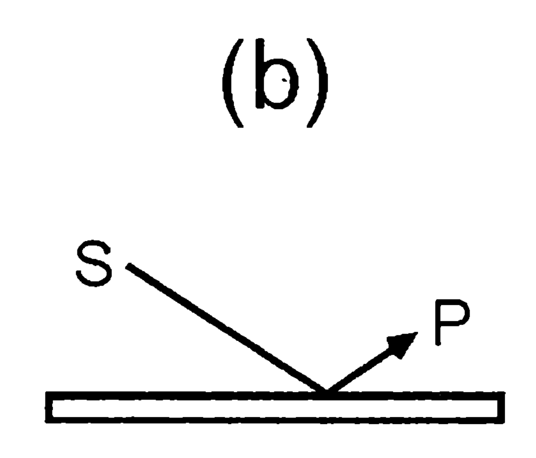


Figura 19. Viziunea clasică asupra lumii afirmă că o oglindă va reflecta lumina în punctul în care unghiul de incidenţă este egal cu unghiul de reflexie, inclusiv în cazul în care sursa şi detectorul se găsesc la înălţimi diferite, aşa cum se întâmplă în varianta (b).

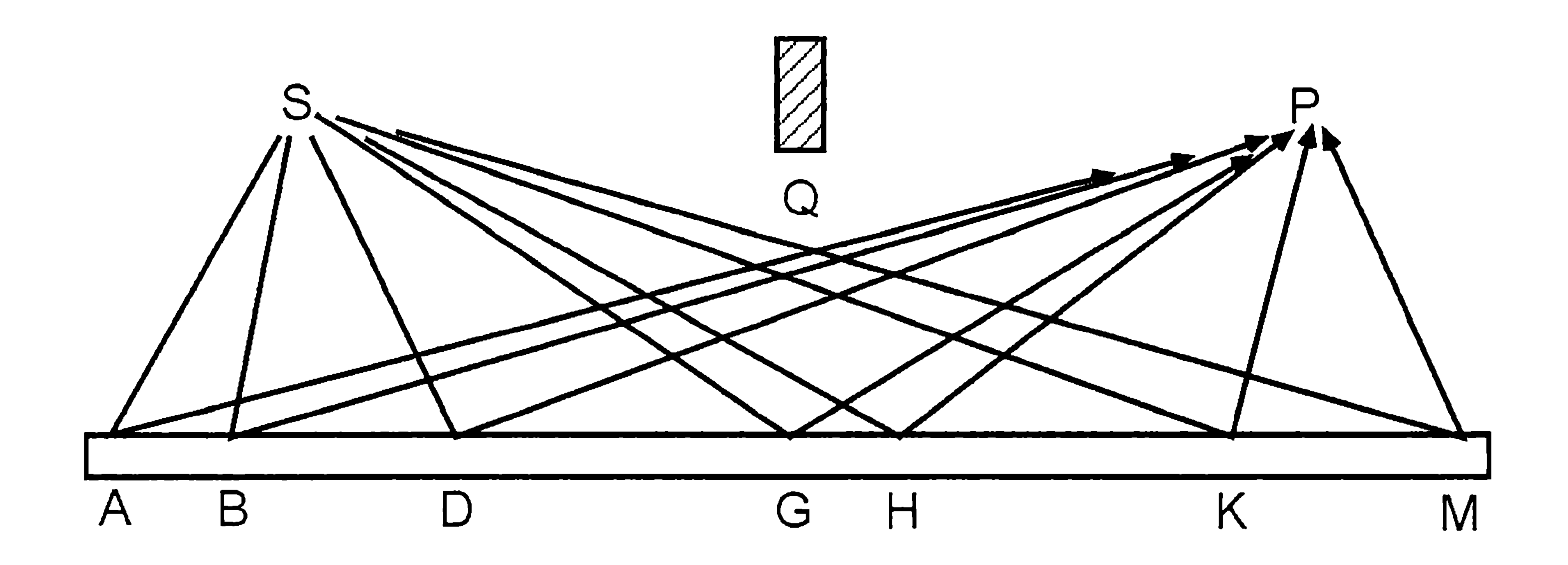


Figura 20. Viziunea cuantică asupra lumii afirmă că lumina are amplitudine egală de reflexie în orice punct al oglinzii, de la A până la M.

din planul foii de hârtie (a se vedea Figura 21). Chiar dacă pe această fâşie de oglindă există în realitate milioane de locuri în care lumina s-ar putea reflecta, haideţi să facem o aproximare şi, pentru moment, să împărţim oglinda într-un număr bine precizat de mici pătrate, considerând numai câte un singur drum pentru fiecare din ele - calculele noastre sunt cu atât mai precise cu cât luăm pătrate din ce în ce mai mici, şi cu cât numărul de drumuri creşte în mod corespunzător.

Acum, haideţi să desenăm câte o săgetuţă pentru fiecare mod în care lumina s-ar putea propaga în situaţia dată. Fiecare mică săgeată are o anumită lungime şi o anumită direcţie. Să luăm mai întâi în discuţie lungimea. Aţi putea crede că săgeata pe care o desenăm pentru a reprezenta drumul către mijlocul oglinzii, în G, este de departe

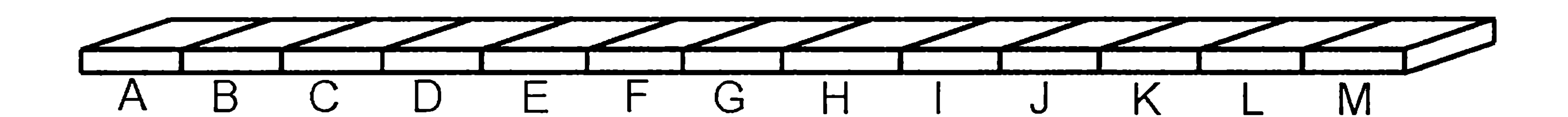


Figura 21. Pentru a calcula mai uşor drumul pe care merge lumina, ar trebui pentru moment să considerăm doar o fâşie de oglindă, împărţită în mici pătrate, fiecărui pătrat corespunzându-i doar un drum. Această simplificare nu afectează în niciun fel analizarea cu precizie a situaţiei.

cea mai lungă (de vreme ce probabilitatea pare a fi foarte mare ca toți fotonii ajunși la detector să o fi luat pe acest drum), și că săgețile corespunzătoare drumurilor pe la capetele oglinzii sunt foarte scurte. Nu, nu, n-ar trebui să instituim o asemenea regulă arbitrară. Regula corectă - ceea ce se petrece efectiv - este mult mai simplă: un foton ce ajunge la detector are șanse aproape egale să o ia pe *oricare* din drumuri, deci toate săgețile au aproape aceeași lungime. (În realitate, există anumite variații foarte mici ale lungimilor, datorate diverselor unghiuri și distanțe implicate, dar ele sunt atât de neînsemnate, încât le voi ignora.) Așadar, haideți să spunem că fiecare săgetuță pe care o vom desena are o lungime standard oarecare - voi lua lungimea foarte mică, pentru că sunt multe astfel de săgeți, corespunzând multelor moduri în care se poate propaga lumina (a se vedea Figura 22).

Dacă despre lungimea tuturor săgeților se poate presupune fără grijă că este aproape la fel, nu același lucru este valabil pentru direcțiile lor. Este evident că acestea vor fi diferite, din cauza diferențelor de timp - așa cum vă aduceți aminte din prima prelegere, direcția unei săgeți anume este determinată de poziția finală a acului unui cronometru imaginar, care măsoară timpul necesar unui foton pentru a parcurge drumul dat. Atunci când un foton se duce mult spre capătul din stânga al oglinzii, în punctul A, și apoi ajunge la detector, este clar că aceasta îi ia un timp mai lung decât îi ia altuia, care ajunge la detector reflectându-se pe mijlocul oglinzii, în punctul G (a se vedea Figura 23). Sau, altfel spus, imaginați-vă pentru o clipă că ați fi în mare grabă, alergând de la sursă la oglindă, iar apoi la detector. V-ar fi limpede că în mod sigur nu este o idee bună să vă duceți tocmai până în punctul A, și apoi să vă întoarceți la detector; ar fi mult mai rapid să atingeți oglinda undeva la mijloc.

Pentru a calcula mai ușor direcția fiecărei săgeți, voi desena un grafic exact dedesubtul schiței cu oglinda (a se vedea Figura 24). În dreptul fiecărui loc de pe oglindă în care s-ar putea reflecta lumina, voi reprezenta pe o axă verticală timpul necesar acesteia pentru parcurgerea drumului respectiv. Cu cât timpul va fi mai lung, cu atât voi lua un punct mai sus pe axă. Începând cu partea stângă a oglinzii, timpul necesar unui foton pentru parcurgerea drumului care suferă

Figura 22. Fiecare mod în care se poate propaga lumina, va fi reprezentat în calculele noastre printr-o săgeată de lungime standard arbitrară, așa ca aceasta.

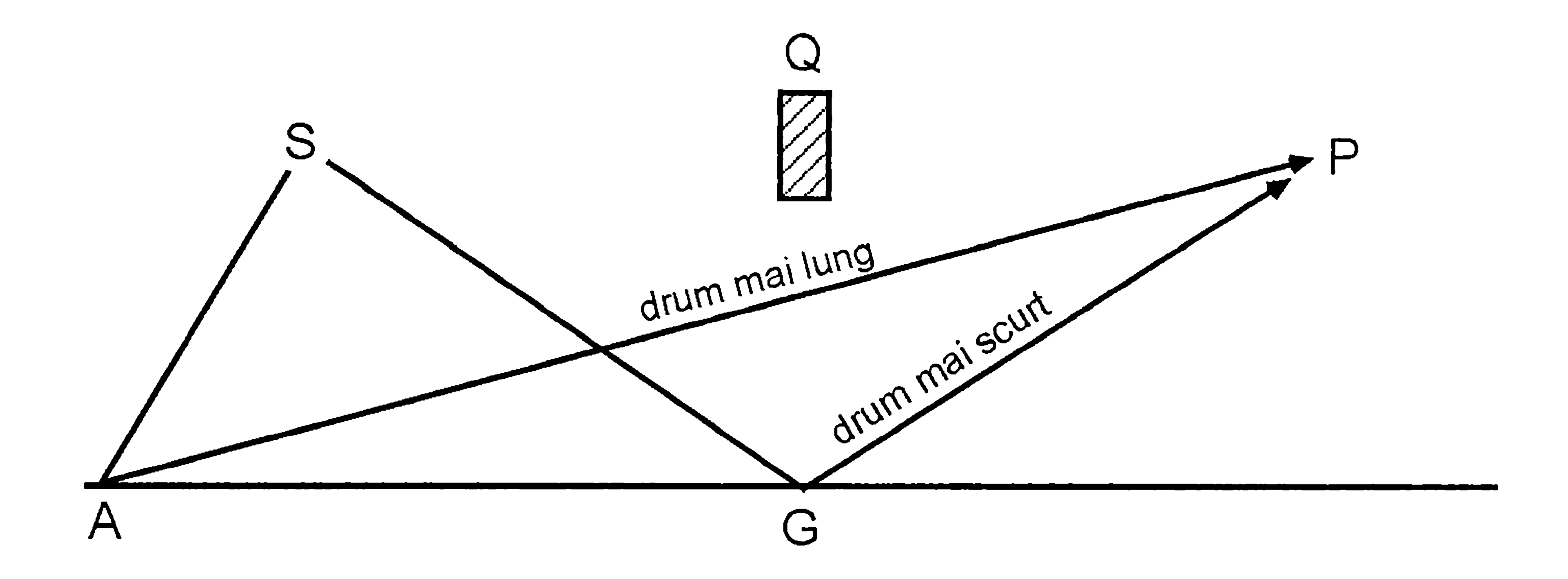
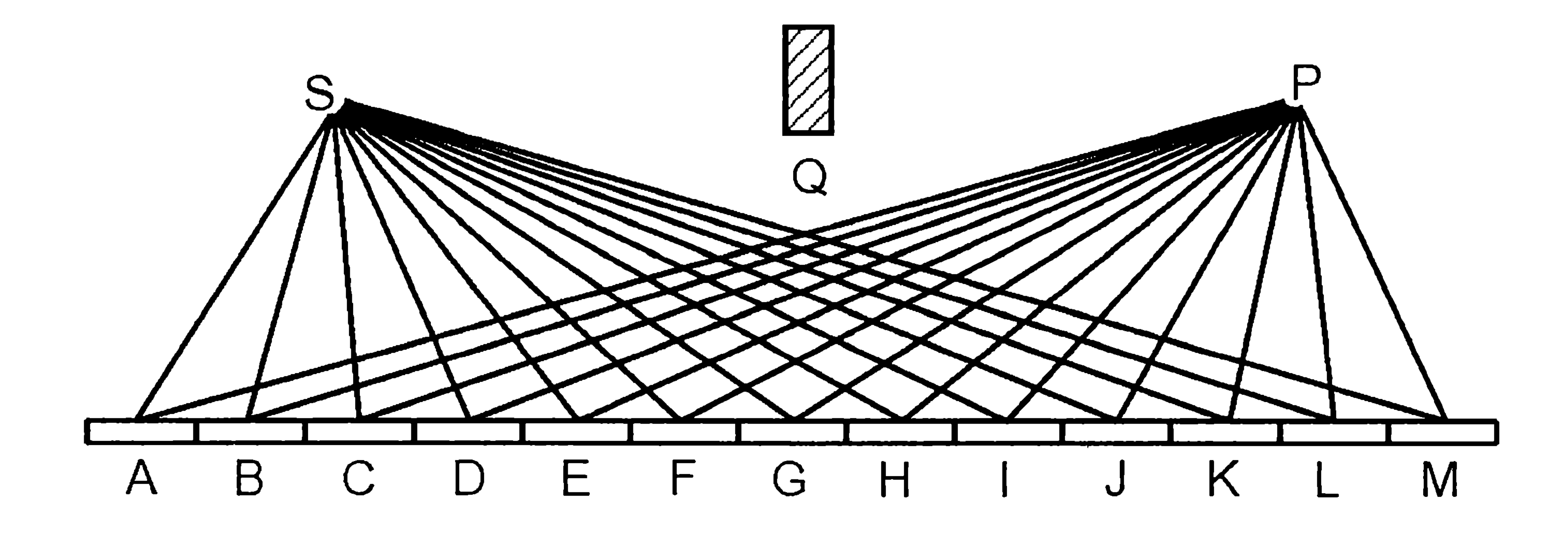


Figura 23. Dacă lungimea fiecărei săgeți este în esență aceeași, direcțiile lor diferă, din cauza timpului necesar unui foton pentru parcurgerea diferitelor drumuri. În mod evident, durează mai mult să mergi de la S la A şi apoi la P, decât să mergi de la S la G şi apoi la P.

reflexie în punctul A este destul de lung, deci voi trasa un punct destul de sus pe axă. Pe măsură ce ne mutăm către mijlocul oglinzii, timpul necesar fotonului pentru parcurgerea drumurilor respective scade, deci trasăm puncte succesive din ce în ce mai jos pe axă. După ce trecem de centrul oglinzii, timpul necesar fotonului creşte din nou, şi deci trasăm iarăşi puncte tot mai ridicate. Pentru a urmări mai uşor graficul, haideți să unim punctele: ele formează o curbă simetrică, ce începe de undeva mai de sus, coboară, iar apoi urcă la loc.

Acuma, ce presupune aceasta pentru direcțiile săgetuțelor? Direcția unei săgeți anume corespunde intervalului de timp necesar unui foton să ajungă de la sursă la detector pe drumul respectiv. Haideți să desenăm săgețile începând din partea stângă. Drumul A necesită timpul cel mai lung; săgeata lui este orientată într-o direcție oarecare (a se vedea Figura 24). Săgeata pentru drumul B este îndreptată într-o altă direcție, pentru că intervalul de timp este diferit. La mijlocul oglinzii, săgețile F, G şi H sunt orientate aproape la fel, deoarece timpii corespunzători sunt aproape egali. După ce trecem de mijlocul oglinzii, observăm că fiecare drum din partea dreaptă a acesteia corespunde unuia din stânga, timpii respectivi fiind perfect egali (aceasta este o consecință a faptului că am plasat sursa şi detectorul la aceeaşi înălțime, şi că am ales punctul G exact la mijloc). Ca atare, săgeata corespunzătoare drumului J, de pildă, are aceeaşi orientare ca cea pentru drumul D.



Timpul

A B C D E F G H I J K L M

H I J M C B K L A G D E F

Figura 24. În partea de sus a figurii sunt reprezentate toate drumurile pe care ar putea-o lua lumina (în situația simplificată). Dedesubtul lor sunt punctați, pe un grafic, timpii corespunzători necesari unui foton pentru a se deplasa de la sursă la oglindă, şi de acolo la detector. Sub axa orizontală a graficului, sunt desenate direcțiile fiecărei săgeți, iar în partea de jos a figurii vedem rezultatul adunării tuturor săgeților. Se observă că aportul major la lungimea săgeții finale este cel al săgetuțelor E, F, G, H şi I, ale căror direcții sunt aproape la fel, din cauză că timpii corespunzători acestor drumuri sunt aproape egali. În plus, aceasta se întâmplă a avea loc în jurul valorii minime a timpului total. Ca atare, este aproximativ corect atunci când se afirmă că lumina se propagă pe drumul pentru care timpul este minim.

Haideți acum să adunăm săgetuțele (a se vedea Figura 24). Începând cu săgeata A, atașăm săgețile una de alta, punându-le cap la cap. Acuma, dacă ar fi să ne plimbăm de-a lungul săgeților, făcând câte un pas pentru fiecare săgetuță, la început nu am ajunge prea departe, căci direcțiile pașilor consecutivi sunt foarte diferite. Dar, după o vreme, săgețile încep să fie îndreptate aproximativ în aceeași direcție, și reușim să înaintăm întrucâtva. Apoi, către finalul plimbării noastre, direcția se modifică iarăși în mod semnificativ de la un pas la altul, și din nou ne împleticim pe loc.

Tot ce avem de făcut acum este să desenăm săgeata finală. Pur și simplu, unim coada primei săgetuțe cu vârful ultimei, și urmărim cât de mult am înaintat efectiv în plimbarea noastră (a se vedea Figura 24). Și băgați de seamă: obținem o săgeată considerabilă! Teoria electrodinamicii cuantice prevede că, într-adevăr, lumina se reflectă pe oglindă!

Haideți acum să analizăm lucrurile. Ce anume determină cât este de lungă săgeata finală? Constatăm o serie de lucruri. În primul rând, capetele oglinzii nu contează: în dreptul lor, săgetuțele se îndreaptă alandala, fără să ducă nicăieri. Dacă aș reteza capetele oglinzii - părțile cu studierea cărora dumneavoastră știați în mod instinctiv că îmi pierd vremea - abia dacă s-ar sesiza vreo diferență în lungimea săgeții finale.

Unde se găsește deci partea oglinzii care face ca lungimea săgeții finale să fie considerabilă? Ea este acolo unde săgetuțele arată toate aproape în aceeași direcție - din cauză că *timpii* corespunzători sunt aproape *egali*. Dacă vă uitați pe graficul timpilor în funcție de drum (a se vedea Figura 24), observați că aceștia variază cel mai puțin de la un drum la altul în partea inferioară a curbei, acolo unde *timpul este minim*. Ca să rezumăm, acolo unde drumurile învecinate sunt aproape egale, acolo timpul este minim; și tot acolo săgetuțele sunt îndreptate aproape în aceeași direcție, dând prin adunare o săgeată finală cu lungime considerabilă; acela este locul unde se stabilește probabilitatea reflectării unui foton pe oglindă. Și acesta este motivul pentru care, în primă aproximație, nu este nicio nenorocire dacă adoptăm viziunea grosolană asupra lumii, potrivit căreia lumina se propagă numai pe drumul pentru care *timpul* este *minim*. (Și se poate arăta ușor că acolo unde timpul este minim, unghiul de incidență este egal cu unghiul de reflexie, dar n-am să-mi pierd vremea cu asta).

Deci, teoria electrodinamicii cuantice ne oferă răspunsul corect - la reflexie, partea importantă a unei oglinzi este mijlocul ei - dar acest rezultat corect se obține cu prețul credinței că lumina se reflectă pe toată oglinda, și că trebuie să adunăm o groază de săgetuțe al căror

unic scop este să se anuleze unele pe altele. Toate acestea v-ar putea părea doar o pierdere de vreme - doar o joacă infantilă de matematicieni. În definitiv, să ai doar ceva ce se anulează, nu prea sună a „fizică adevărată".

Haideți acum să verificăm, printr-un alt experiment, faptul că, într-adevăr, *chiar există* reflexie de-a lungul întregii oglinzi. Mai întâi, haideți să decupăm o mare parte din oglindă, şi să lăsăm doar aproximativ un sfert din ea, în capătul din stânga. Încă dispunem de o bucată consistentă de oglindă, dar care nu este amplasată acolo unde trebuie. În experimentul anterior, săgețile din partea stângă a oglinzii erau îndreptate în direcții mult diferite unele față de altele, din cauza diferențelor mari între intervalele de timp corespunzând drumurilor învecinate (a se vedea Figura 24). În cadrul acestui experiment, voi efectua un calcul mai detaliat, împărțind partea din stânga a oglinzii în porțiuni mult mai înguste - suficient de fine încât să nu existe mari diferențe de timp pentru drumurile învecinate (a se vedea Figura 25). Din această perspectivă mai detaliată, observăm că unele dintre săgetuțe sunt orientate mai mult sau mai puțin spre dreapta, iar altele sunt orientate mai mult sau mai puțin spre stânga. Dacă le adunăm pe *toate*, obținem un mănunchi de săgeți care în esență se învârtesc în cerc, neducând nicăieri.

Dar haideți să presupunem că scrijelim cu grijă oglinda în dreptul acelor porțiuni pentru care săgetuțele prezintă o tendință către una din direcții - să zicem, înspre stânga - astfel încât, în linii mari, să rămânem doar cu săgețile orientate în cealaltă direcție (a se vedea Figura 26). Atunci când adunăm doar săgetuțele orientate mai mult sau mai puțin spre dreapta, obținem o serie de depresiuni şi o săgeată finală considerabilă - potrivit teoriei, ar trebui să avem acum o reflexie puternică! Şi, într-adevăr, avem - teoria este corectă. O astfel de oglindă se numeşte rețea de difracție, şi funcționează de minune.

Nu-i aşa că este superb - să ai o bucată de oglindă acolo unde nu te-ai aştepta la vreo reflexie, să răzuieşti o parte din ea, şi ea atunci să reflecte![1]

---

[1] Regiunile oglinzii pentru care săgetuțele sunt orientate în linii mari spre stânga, produc şi ele o reflexie puternică (atunci când sunt eliminate regiunile pentru care săgetuțele arată spre dreapta). Anularea apare doar atunci când reflexia se produce şi pe unele şi pe celelalte. Acest lucru este analog fenomenului de reflexie parțială pe două suprafețe: deşi fiecare suprafață reflectă lumina în mod independent, atunci când grosimea are o astfel de valoare încât ele să contribuie cu săgetuțe orientate în direcții opuse, reflexia dispare.

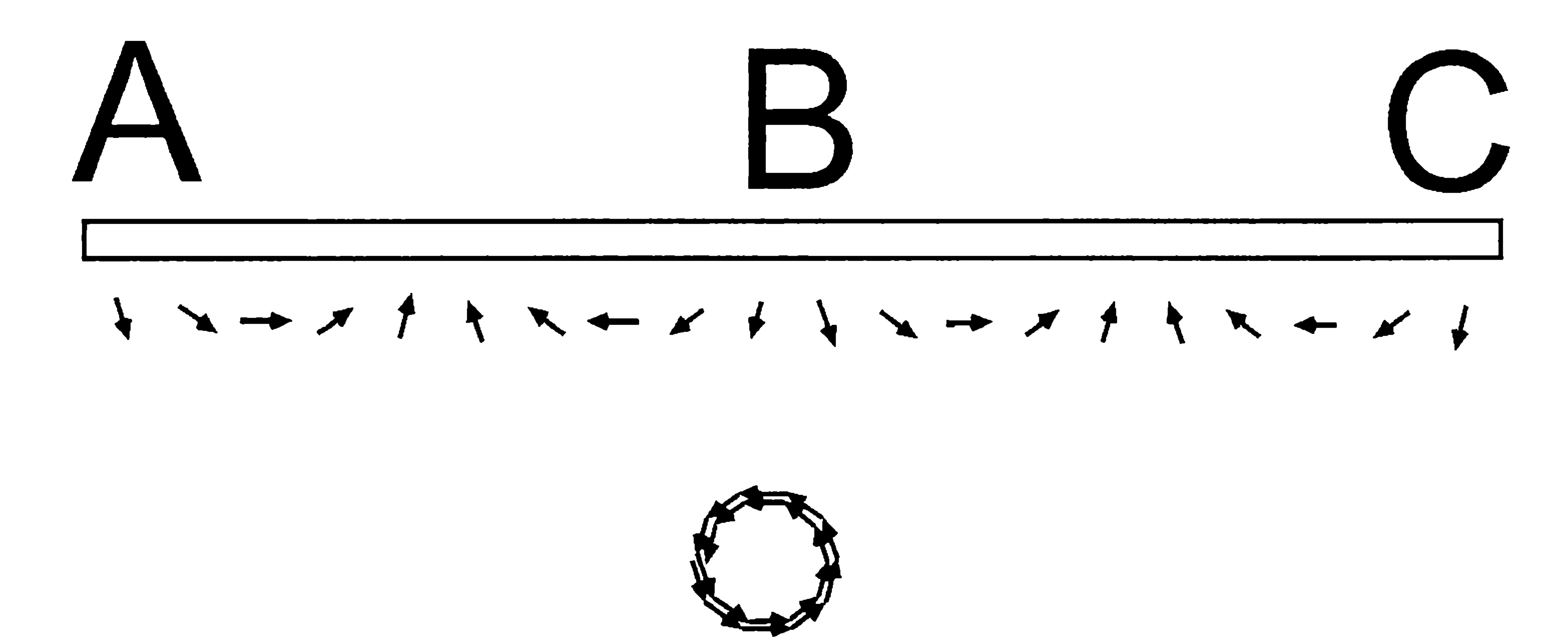


Figura 25. Pentru a verifica faptul că, într-adevăr, există reflexie pe capetele oglinzii (dar că pur şi simplu ea se anulează), efectuăm un experiment cu o porţiune mare de oglindă, situată incorect în raport cu reflexia de la S la P. Porţiunea respectivă se împarte în secţiuni mult mai mici, astfel încât intervalele de timp corespunzătoare drumurilor învecinate să nu difere foarte mult. Atunci când se adună toate săgetuţele, nu se obţine nimic: ele se învârtesc în cerc, dând rezultat aproape nul.

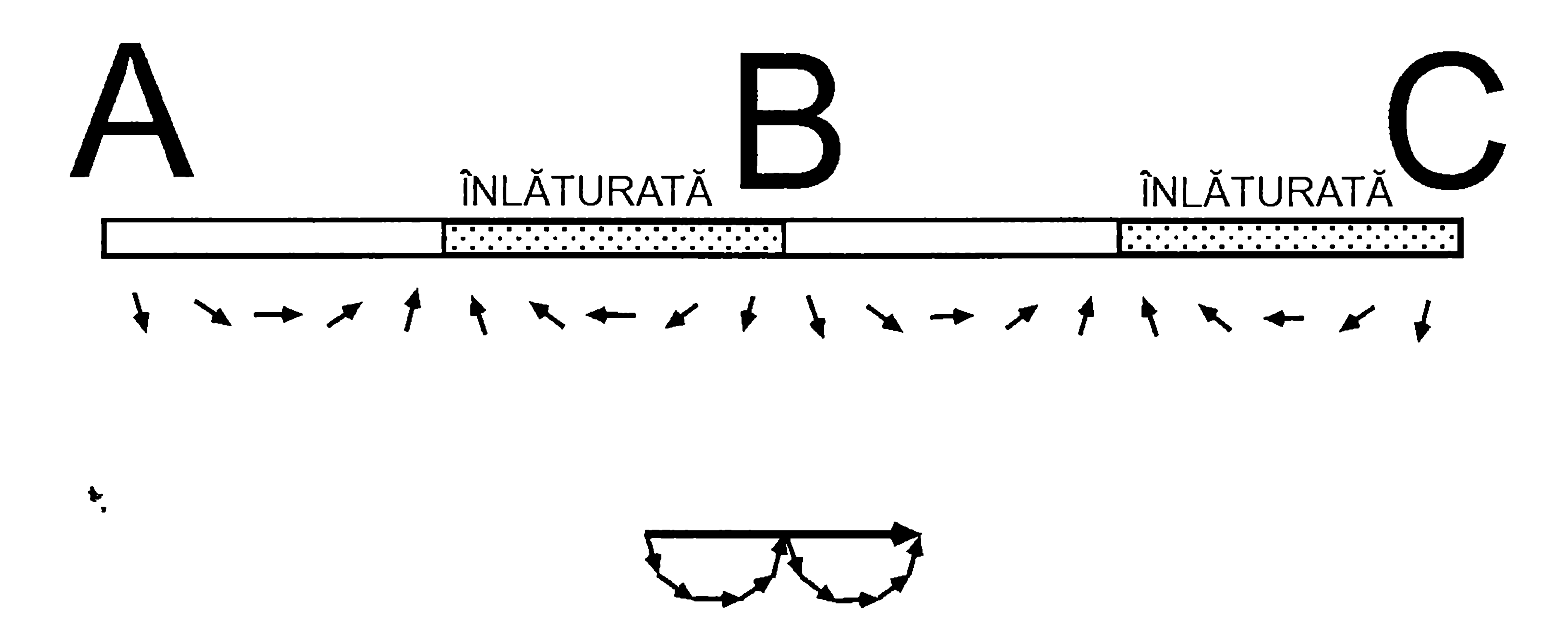


Figura 26. Dacă se adună numai săgetuţele cu o tendinţă către o anumită direcţie - de pildă, către dreapta - iar celelalte sunt scoase din calcul (mătuind oglinda în locurile corespunzătoare), atunci, pe o astfel de oglindă plasată incorect, se reflectă o cantitate considerabilă de lumină. O asemenea oglindă cu zgârieturi, se numeşte reţea de difracţie.

Rețeaua de difracție pe care tocmai v-am prezentat-o, a fost realizată special pentru lumină roşie. Ea nu ar funcționa pentru lumină albastră; ar trebui realizată o altă rețea, cu zgârieturi mai apropiate între ele, deoarece v-am spus în prima prelegere că acul cronometrului se roteşte mai rapid atunci când măsoară timpii pentru un foton albastru decât pentru unul roşu. Astfel, decupările special trasate pentru rata de rotație „roşie“, nu s-ar potrivi cu locurile corespunzând luminii albastre, iar săgetuțele s-ar încurca unele pe altele, şi rețeaua nu ar funcționa cum trebuie. Însă, întâmplător, dacă am coborî fotomultiplicatorul la un unghi oarecum diferit, rețeaua realizată pentru lumină roşie ar funcționa atunci pentru lumină albastră. Este doar o potrivire, o consecință accidentală a geometriei implicate în fenomen (a se vedea Figura 27).

Dacă proiectați lumină albă pe o rețea de difracție, lumina roşie se obține într-un anumit loc, lumina portocalie se obține un pic mai sus, apoi, încă şi mai sus, urmează lumina galbenă, verde, albastră - toate culorile curcubeului. Acolo unde întâlniți o serie de striuri apropiate între ele - de exemplu, la un disc de pick-up, sau, şi mai bine, la un compact disc - puteți adeseori observa spectrul culorilor, atunci când suprafața este puternic iluminată sub anumite unghiuri. Probabil că ați văzut acele superbe abțibilduri argintii (aici, în însorita Californie, lumea le lipeşte adesea pe automobile, în spate): atunci când maşina se află în mişcare, se observă culori foarte intense, mergând de la roşu

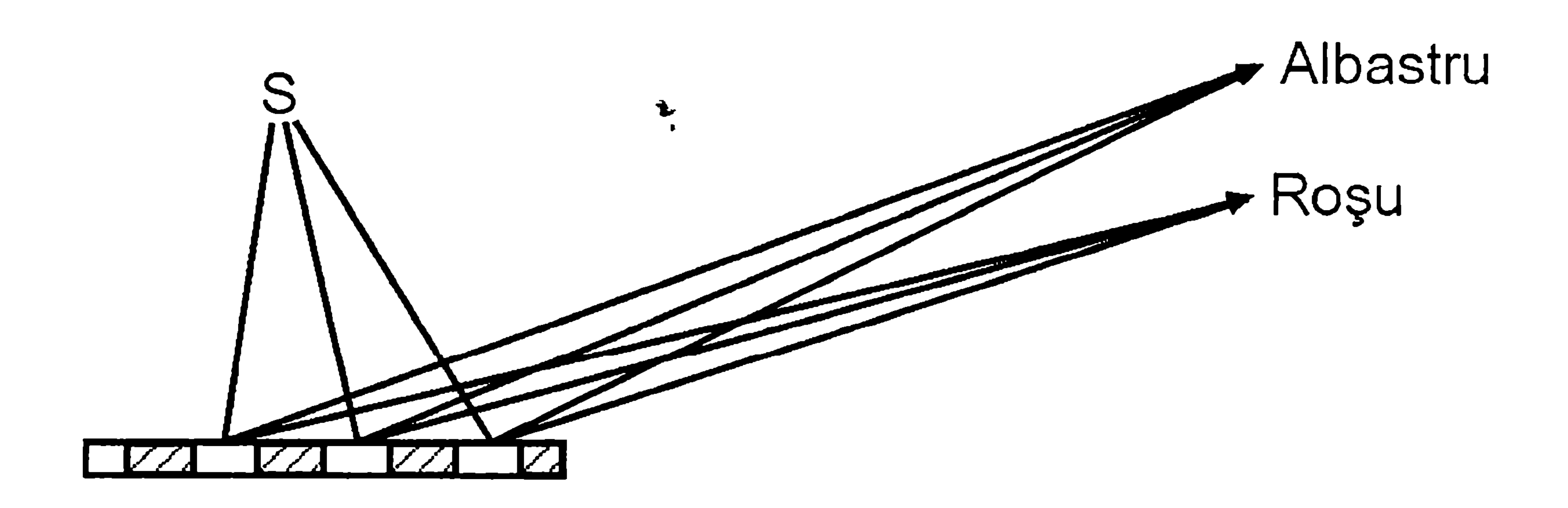


Figura 27. O rețea de difracție cu striații trasate la distanțe potrivite pentru lumina roşie, poate funcționa şi pentru alte culori, cu condiția ca detectorul să se găsească într-o altă poziție. Astfel, în funcție de unghiul de înclinare, este posibil ca pe o suprafață striată - cum ar fi, de pildă, suprafața unui compact disc - să se observe prin reflexie diferite culori.

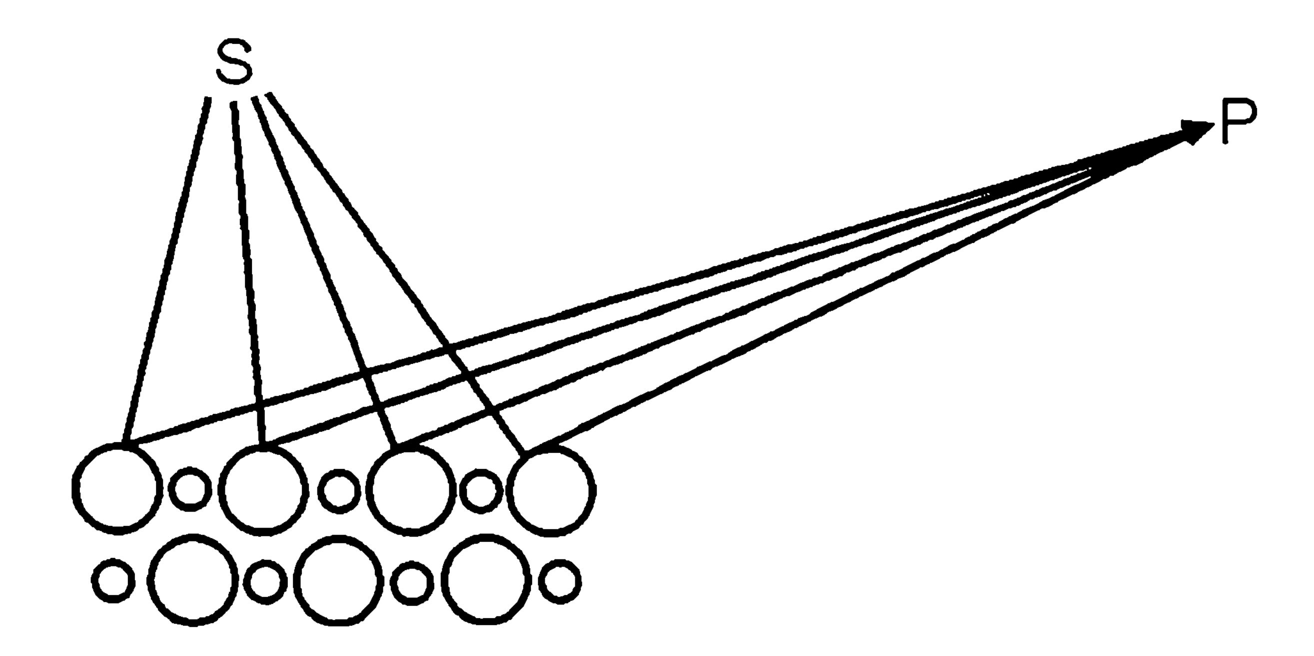


Figura 28. Natura a realizat multe tipuri de rețele de difracție, sub formă de cristale. Cristalul de sare reflectă razele X (o lumină pentru care acul cronometrului nostru imaginar se rotește extrem de rapid, aproximativ de 10.000 de ori mai repede decât pentru lumina vizibilă) sub diferite unghiuri, fapt din care se poate determina cu exactitate maniera de dispunere a atomilor și distanțele dintre ei.

la albastru. Acum știți de unde provin aceste culori: aveți în fața ochilor o rețea de difracție - o oglindă zgâriată în locuri bine precizate. Sursa de lumină este Soarele, iar ochii dumneavoastră sunt detectorul. Aș putea continua, explicându-vă cum funcționează laserele și hologramele, dar știu că nu toată lumea a văzut așa ceva, și am multe alte lucruri despre care să vă vorbesc.[2]

Deci, o rețea de difracție ne arată faptul că nu putem ignora părțile de oglindă care nu par să reflecte: dacă prelucrăm oglinda în mod ingenios, putem demonstra veridicitatea reflexiei în toate punctele acesteia, și putem produce anumite fenomene optice surprinzătoare.

---

[2] Nu pot să nu vă spun despre o rețea de difracție realizată de Natură: cristalul de sare, care reprezintă atomi de sodiu și de clor dispuși într-o manieră regulată . Tiparul lui alternat, la fel ca suprafețele noastre striate, acționează precum o rețea de difracție, atunci când asupra lui se proiectează lumină de culoare convenabilă (în cazul acesta, raze X). Determinând locurile anume în care un detector recepționează din plin această reflexie specială (numită difracție), se poate stabili cu exactitate cât de depărtate sunt striațiile între ele și, ca atare, cât de depărtați sunt atomii între ei (a se vedea Figura 28). Este o manieră minunată de a determina structura oricărui cristal și de a confirma faptul că razele X sunt același lucru ca lumina. Astfel de experimente au fost efectuate pentru prima dată în 1914. A fost extrem de pasionant să se observe, pentru prima dată, modul în care atomii sunt dispuși în cadrul diferitor substanțe.

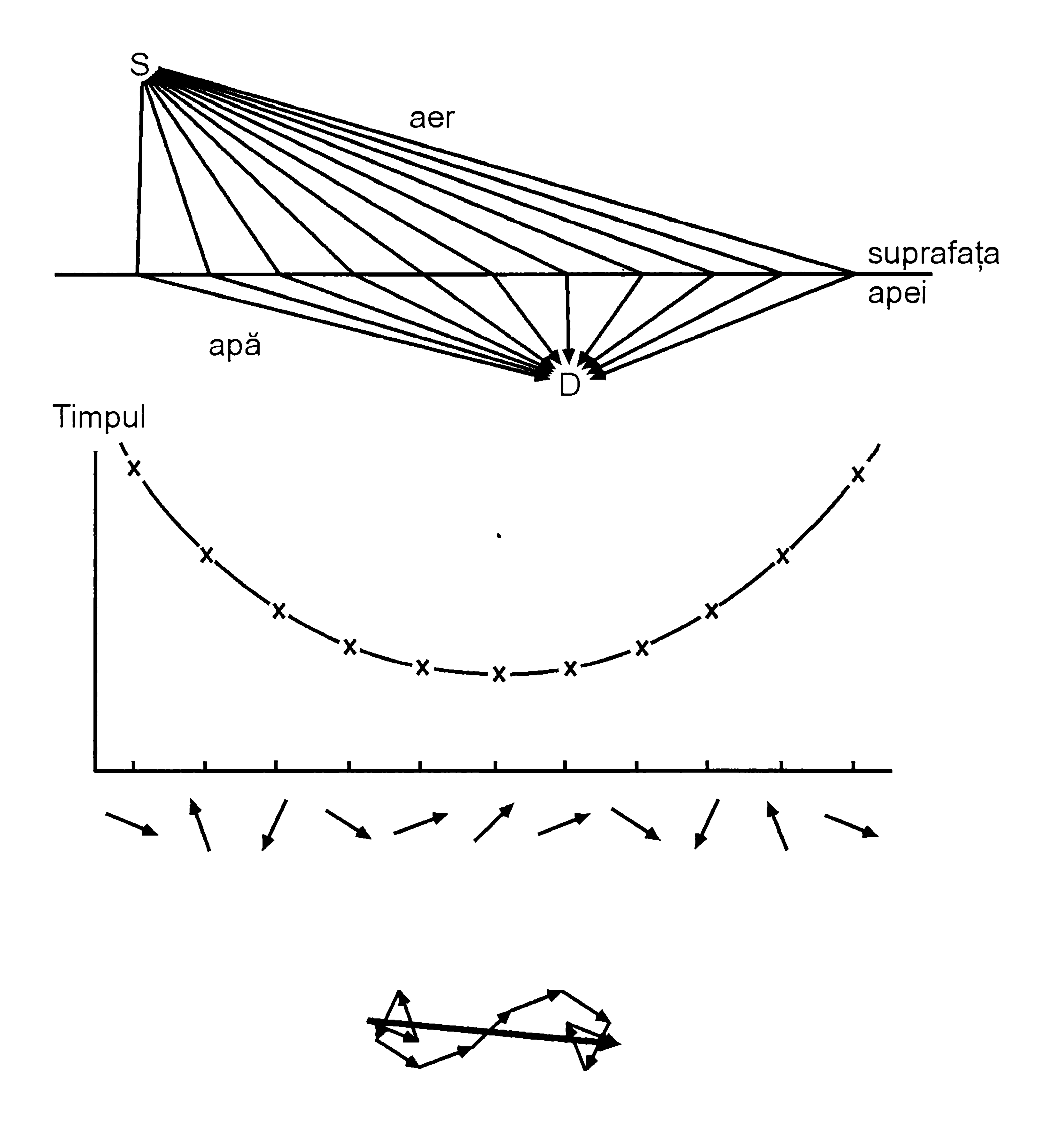


Figura 29. Teoria cuantică afirmă că lumina se poate propaga în multe feluri de la o sursă situată în aer la un detector plasat în apă. Dacă simplificăm această chestiune la fel cum am făcut în cazul unei oglinzi, putem trasa graficul intervalului de timp necesar pentru parcurgerea fiecărui drum, iar dedesubt să reprezentăm săgetuța corespunzătoare. Încă o dată, contribuția majoră la lungimea săgeții finale vine din partea acelor drumuri pentru care săgetuțele sunt îndreptate aproape în aceeași direcție; altfel spus, din partea acelor drumuri pentru care intervalele de timp corespunzătoare sunt aproximativ egale. Și, încă o dată, acest lucru se întâmplă acolo unde timpul este minim.

Şi mai important încă, demonstrarea veridicității reflexiei pe *orice* porțiune a oglinzii, ne dovedeşte faptul că există o amplitudine - o săgeată - pentru *fiecare mod* în care se poate petrece un eveniment. Şi, pentru a calcula în mod corect probabilitatea unui eveniment în diferite circumstanțe, trebuie să adunăm *toate* modurile în care acel eveniment se poate întâmpla, nu doar pe cele care ni se par nouă importante!

Acuma, aş dori să vă vorbesc despre ceva mai familiar decât rețelele de difracție - despre trecerea luminii din aer în apă. De această dată, haideți să plasăm fotomultiplicatorul sub nivelul apei - presupunem că experimentatorul poate realiza acest lucru! Sursa de lumină este situată în aer, în punctul S, iar detectorul este în apă, în punctul D (a se vedea Figura 29). Încă o dată, vrem să calculăm probabilitatea ca un foton să ajungă de la sursa de lumină la detector. Pentru a face acest calcul, va trebui să luăm în considerare toate drumurile pe care ar putea-o lua lumina. Fiecare modalitate a luminii de a se propaga, contribuie cu o unică săgeată, exact ca în exemplul anterior, toate săgetuțele având lungimi aproape egale. Putem, încă o dată, trasa graficul intervalului de timp necesar unui foton pentru parcurgerea fiecărui drum posibil. Curba graficului va fi foarte asemănătoare cu cea din cazul reflexiei luminii pe o oglindă: începe de la valori mari, apoi scade, după care creşte la loc. Contribuțiile cele mai importante vin din partea regiunilor pentru care săgetuțele sunt îndreptate aproape în aceeaşi direcție (cele pentru care intervalele de timp corespunzătoare drumurilor învecinate diferă cel mai puțin); adică, din partea regiunii inferioare a curbei. Ceea ce înseamnă, de asemenea, de acolo de unde timpul este minim; deci, tot ce avem de făcut, este să găsim pe ce drum anume intervalul de timp este minim.

Se vădeşte că lumina pare a se propaga mai lent prin apă decât prin aer (motivul pentru aceasta vi-l voi explica în prelegerea următoare), ceea ce face ca distanța parcursă prin apă să fie, ca să zicem aşa, mai „costisitoare" din punctul de vedere al timpului necesar, decât distanța parcursă prin aer. Nu este greu de realizat care este drumul ce necesită cel mai scurt timp: să presupunem că dumneavoastră sunteți salvamarul, şi vă aflați în punctul S, iar fata frumoasă este în pericol să se înece în punctul D (a se vedea Figura 30). Pe uscat puteți alerga mai repede decât puteți înota în apă. Problema care se pune este în ce punct trebuie să intrați în apă pentru a ajunge cel mai repede la victima care stă să se înece. Alergați oare spre apă până în punctul A,

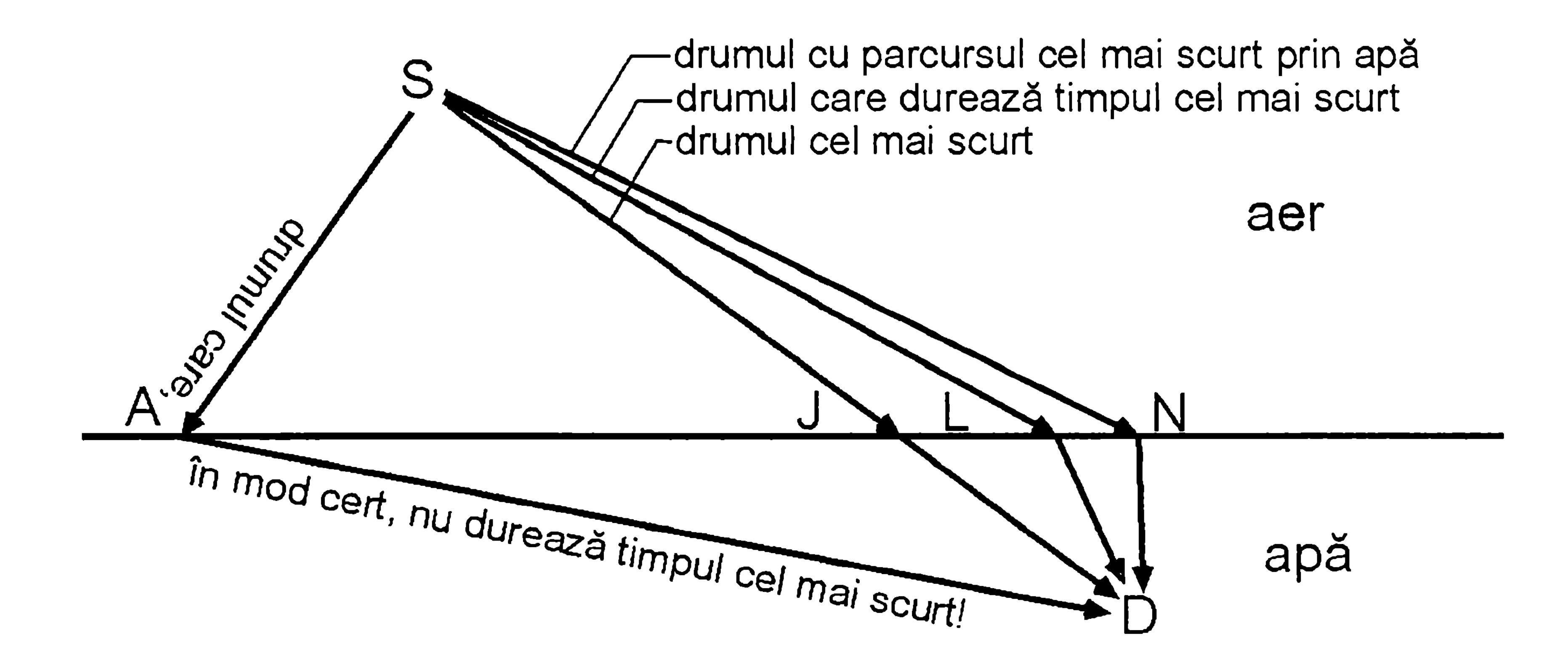


Figura 30. Găsirea drumului care să-i ia luminii cel mai scurt timp, este analoagă cu găsirea drumului pe care un salvamar să ajungă cel mai repede în ajutorul unei victime ce stă să se înece: drumul cu distanța cea mai mică, include o porțiune prea lungă prin apă; drumul cu cea mai scurtă porțiune prin apă, include o porțiune prea mare pe uscat; drumul corespunzător timpului minim este un compromis între acestea două.

după care înotați de acolo de mama focului? Bineînțeles că nu. Dar nici dacă alergați direct spre victimă şi intrați în apă în punctul J, nu urmați cea mai rapidă rută. Chiar dacă pentru un salvamar, în circumstanțele respective, ar fi o prostie să stea să analizeze şi să calculeze acest lucru, există o poziție bine precizată de intrare în apă, pentru care timpul este minim: este vorba de un compromis între drumul direct, care trece prin J, şi drumul cu cea mai mică distanță prin apă, cel trecând prin punctul N. Şi la fel stau lucrurile şi cu lumina - drumul corespunzător timpului minim intră în apă printr-un punct între J şi N, cum ar fi L.

Un alt fenomen luminos pe care aş dori să vi-l menționez pe scurt este fata-morgana. Atunci când mergeți cu maşina pe o şosea foarte fierbinte, se poate întâmpla uneori să vi se pară că vedeți drumul ud. Ceea ce vedeți de fapt este cerul, iar dumneavoastră considerați că el se observă din cauză că pe asfalt ar fi băltoace cu apă (reflexia parțială a luminii pe o suprafață singulară). Dar cum de puteți vedea cerul pe şosea, dacă aceasta nu este udă? Trebuie să ştiți că prin aerul

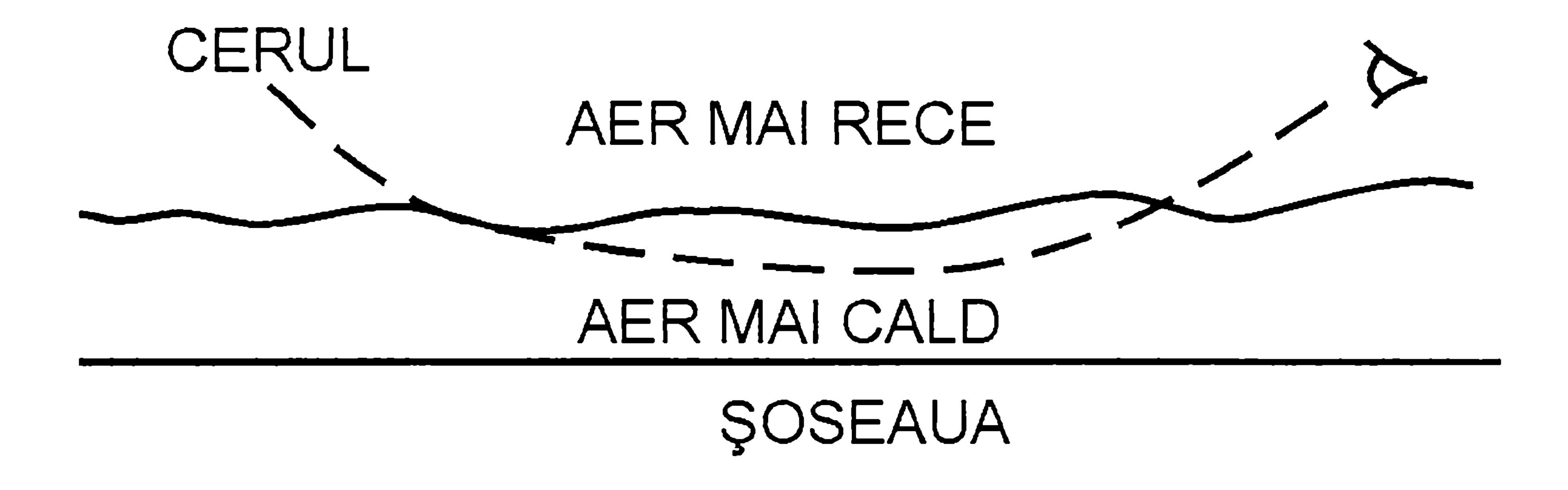


Figura 31. Producerea fenomenului de fata-morgana se poate explica determinând drumul corespunzător timpului minim. Lumina se propagă mai rapid prin aerul cald decât prin cel rece. O parte a cerului apare ca văzându-se pe şosea, deoarece parte din lumină ajunge la ochi venind de jos în sus. Singura altă situaţie în care cerul se vede reflectat pe şosea, este atunci când aceasta este udă, şi astfel se creează mirajul că pe drum sunt băltoace cu apă.

rece lumina se propagă mai lent decât prin aerul încins, şi, pentru ca mirajul să fie vizibil, observatorul trebuie să se găsească în stratul de aer mai rece, de deasupra celui foarte fierbinte de la nivelul şoselei (a se vedea Figura 31). Putem înţelege cum de este posibil să te uiţi *în jos* şi să vezi cerul, dacă trasăm drumul corespunzător timpului minim. Am să vă las pe dumneavoastră să vă distraţi cu chestia aceasta acasă - este interesant de analizat, şi vă puteţi prinde singuri foarte uşor.

În exemplele pe care vi le-am prezentat, în care lumina se reflectă pe o oglindă şi, respectiv, trece din aer în apă, am făcut o aproximare, din dorinţa de a simplifica lucrurile: am desenat diferitele drumuri pe care se putea propaga lumina, ca pe două segmente de dreaptă, formând un anumit unghi între ele. Dar nu este nevoie să *presupunem* că într-un mediu uniform cum ar fi apa ori aerul, lumina se propagă în linie dreaptă: chiar şi *acest lucru* este explicabil prin intermediul principiului general al teoriei cuantice, potrivit căruia probabilitatea unui eveniment se determină adunând săgetuţele corespunzătoare *tuturor* modurilor în care evenimentul se poate petrece.

Aşa încât, în următorul nostru exemplu, vă voi prezenta maniera în care, adunând săgetuţe, ne poate apărea că lumina se propagă în linie dreaptă. Haideţi să considerăm o sursă şi un fotomultiplicator, plasate în punctele S şi respectiv P (a se vedea Figura 32), şi să urmărim *toate*

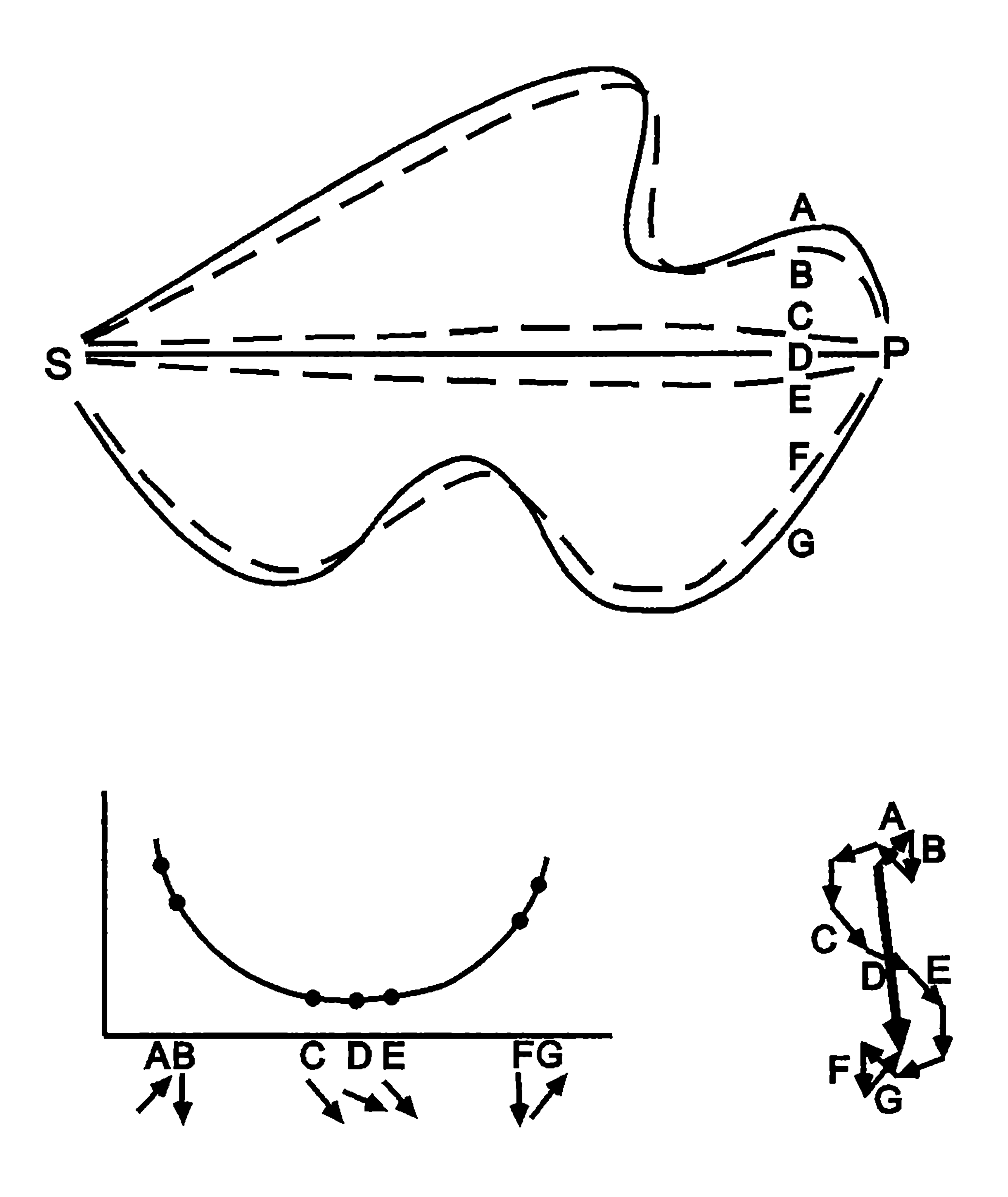


Figura 32. Teoria cuantică poate fi utilizată pentru a arăta din ce cauză ni se pare că lumina se propagă în linie dreaptă. Dacă se consideră toate drumurile posibile, atunci fiecărui drum întortocheat, îi corespunde unul învecinat având o lungime substanțial mai mică și, în consecință, un timp de parcurgere mult mai mic (și o direcție mult diferită a săgetuței respective). Doar drumurile apropiate de linia dreaptă D au săgetuțele orientate aproape în aceeași direcție, deoarece doar ele au timpi de parcurgere aproximativ egali. Doar aceste săgetuțe au importanță, pentru că numai din adunarea lor se obține săgeata finală lungă.

modurile - drumurile întortocheate în toate felurile - în care lumina s-ar putea propaga de la sursă la detector. Să desenăm apoi câte o săgetuță pentru fiecare drum, și să spunem lecția învățată bine!

Pentru fiecare drum întortocheat, cum ar fi drumul A, există un drum învecinat un pic mai drept și sensibil mai scurt - adică, un drum ce durează mult mai puțin. Însă, atunci când drumurile devin aproape drepte - în cazul lui C, de pildă - un drum învecinat și mai drept necesită pentru parcurgere aproape același interval de timp. Aceasta este situația în care, în loc să se anuleze între ele, săgetuțele conlucrează; acesta este drumul pe care o ia lumina.

Este important de subliniat faptul că săgetuța singulară corespunzând drumului în linie dreaptă D (a se vedea Figura 32), nu este suficientă pentru a da socoteală de probabilitatea ca lumina să se propage de la sursă la detector. Contribuții importante au și drumurile învecinate - de exemplu, C și E - aproape drepte. Deci, lumina nu se propagă *realmente* doar în linie dreaptă; ea „adulmecă" drumurile din jurul ei, și face uz de o mică vecinătate concentrată din spațiu. (În același fel, pentru a reflecta în mod corespunzător, o oglindă trebuie să aibă suficientă întindere: dacă dimensiunile ei sunt prea mici în comparație cu fasciculul de drumuri învecinate, lumina se împrăștie într-o mulțime de direcții, indiferent de locul în care oglinda este așezată.)

Haideți să investigăm mai de aproape acest miez de lumină. Luăm o sursă S și un fotomultiplicator P, iar între ele plasăm două blocuri masive, care să împiedice răspândirea prea mare a luminii (a se vedea Figura 33). Acum, haideți să plasăm un al doilea fotomultiplicator în punctul Q, mai jos de P, și să presupunem din nou, pentru simplitate, că lumina poate ajunge din S în Q doar de-a lungul unor drumuri de forma a două segmente de dreaptă, dispuse sub un anumit unghi unul față de celălalt. Ce se întâmplă în acest caz? Atunci când spațiul dintre blocuri este suficient de larg pentru a permite numeroase drumuri învecinate către P și către Q, săgetuțele corespunzătoare drumurilor către P se adună între ele (deoarece toate durează aproximativ același timp), pe când cele corespunzătoare drumurilor către Q se anulează între ele (pentru că prezintă diferențe de timp substanțiale). Și astfel, fotomultiplicatorul din Q nu produce clicuri.

Dar, pe măsură ce apropiem blocurile unul de altul, la un moment dat, detectorul din Q începe să producă clicuri! Atunci când spațiul dintre blocuri dispare aproape complet, și mai există doar câteva drumuri învecinate, săgetuțele drumurilor spre Q se adună și acestea, deoarece aproape că nu mai există diferență de timp între ele (a se vedea Figura 34). Desigur, ambele săgeți finale sunt micuțe, pentru că

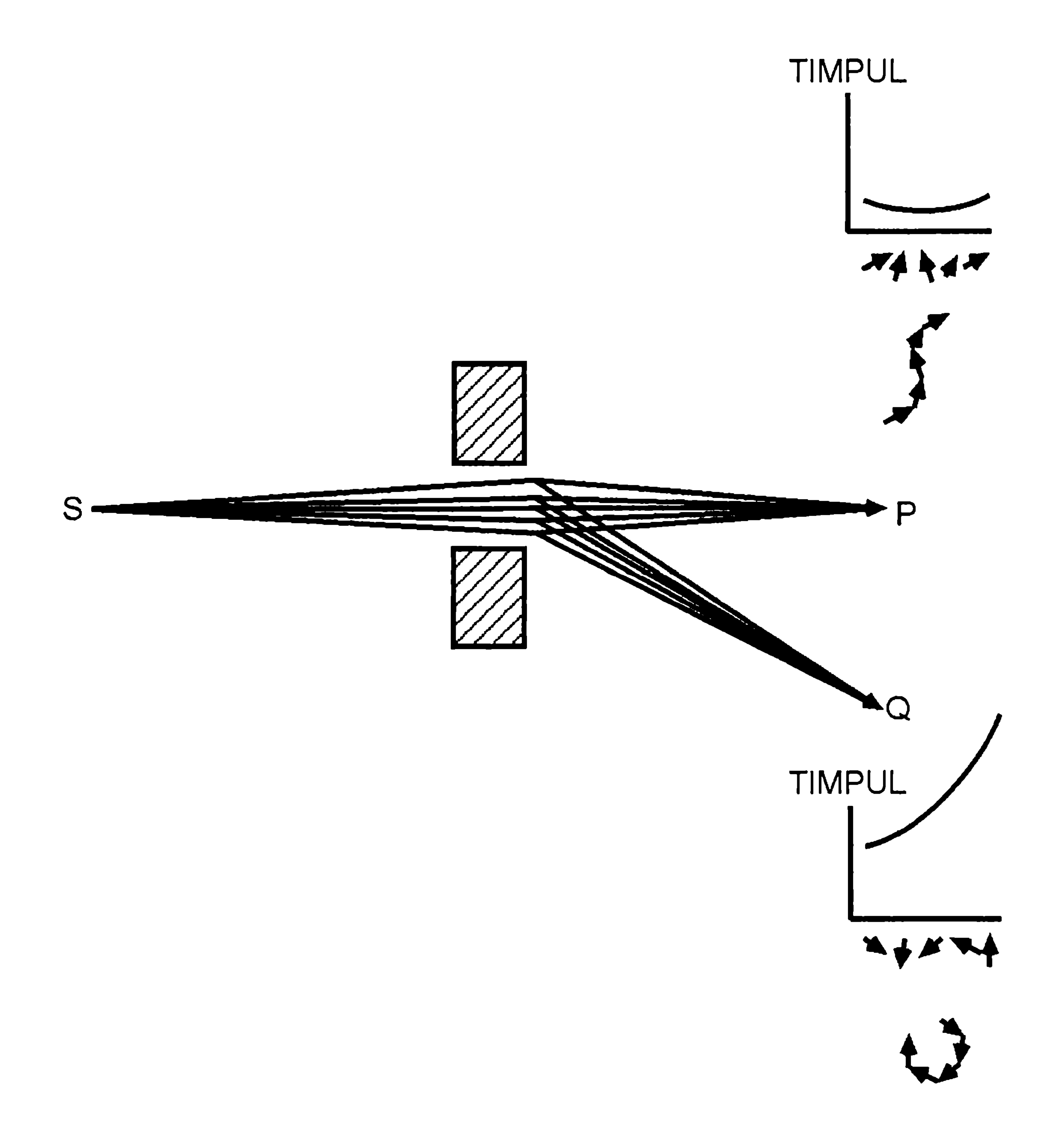


Figura 33. Lumina nu se propagă doar de-a lungul drumului în linie dreaptă, ci şi de-a lungul drumurilor învecinate lui. Atunci când două blocuri masive sunt dispuse în calea luminii la o distanţă suficient de mare unul de altul pentru a permite aceste drumuri învecinate, mai toţii fotonii ajung, aşa cum este normal, în punctul P, şi abia dacă ajung câţiva în Q.

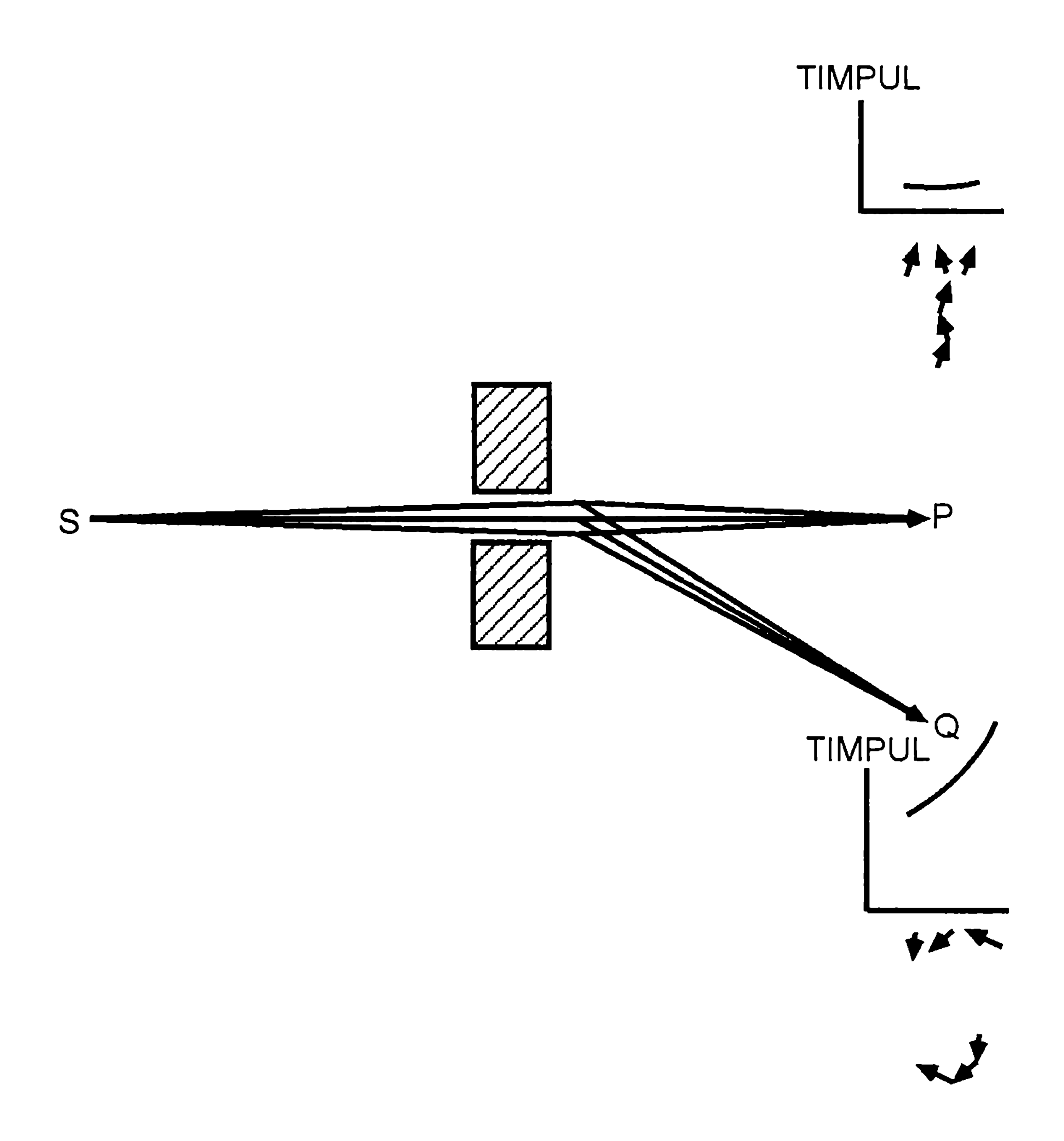


Figura 34. Atunci când lumina este constrânsă atât de mult încât rămân doar puține drumuri posibile, partea care reuşeşte să treacă prin deschizătura îngustă, ajunge în punctul Q aproape la fel de mult ca în punctul P, deoarece nu mai există suficiente săgetuțe corespunzătoare drumurilor către Q care să se anuleze reciproc.

prin acel spațiu îngust nu poate trece multă lumină, dar detectorul din Q clicăie aproape la fel de mult ca cel din P. Deci, atunci când încercați să storciți lumina foarte mult, pentru a vă asigura că ea se propagă doar în linie dreaptă, aceasta refuză să coopereze, începând să se împrăştie.[3]

Aşadar, ideea că lumina se propagă în linie dreaptă reprezintă o aproximare, convenabilă pentru a descrie lucrurile familiare nouă ce se întâmplă în natură; ea este similară aproximării grosolane potrivit căreia, atunci când lumina se reflectă pe o oglindă, unghiul de incidență este egal cu unghiul de reflexie.

Exact aşa cum am fost în stare, printr-o şmecherie isteață, să concepem că lumina se reflectă pe o oglindă sub diferite unghiuri, tot la fel putem face o scamatorie asemănătoare prin care lumina să se propage dintr-un punct în altul pe multe drumuri.

Mai întâi, pentru a simplifica situația, voi desena o linie punctată (a se vedea Figura 35) între sursa de lumină şi detector (linia nu are nicio semnificație concretă, este o pură abstracțiune) şi voi afirma că singurele drumuri pe care le vom studia sunt cele alcătuite din două segmente de dreaptă formând un anumit unghi. Graficul reprezentând timpii necesari parcurgerii fiecărui drum arată la fel ca în cazul oglinzii (însă de această dată îl voi desena în lateral): curba porneşte de la o valoare mare, pentru drumul A, după care coboară, deoarece drumurile din mijloc sunt mai scurte şi necesită mai puțin timp. În final, curba creşte la loc.

Acum, haideți să ne distrăm puțin. Haideți să „păcălim lumina", astfel încât *toate* drumurile să dureze exact la fel. Cum putem face asta? Cum putem face ca cel mai scurt drum, cel ce trece prin punctul M, să dureze exact acelaşi timp cât cel mai lung, prin punctul A?

---

[3] Acest fapt constituie un exemplu de acțiune a „Principiului de Incertitudine": există un soi de „complementaritate" între cunoaşterea locului pe unde trece lumina printre cele două blocuri, şi cunoaşterea locului unde ajunge ea după aceea – nu este posibilă cunoaşterea precisă a ambelor. Aş dori să plasez Principiul Incertitudinii în contextul său istoric. Atunci când au început să se cristalizeze revoluționarele idei ale fizicii cuantice, lumea încă încerca să le înțeleagă în termenii conceptelor demodate (cum ar fi cel că lumina se propagă în linie dreaptă). Dar, la un moment dat, conceptele vechi au început să se năruiască, aşa încât s-a lansat un avertisment care a afirmat fățiş că „ideile demodate sunt bune de aruncat în situațiile în care..." Dacă renunțați la toate aceste idei învechite şi în locul lor utilizați conceptele pe care vi le prezint eu în aceste prelegeri – adunarea de *săgetuțe* pentru fiecare mod în care se poate petrece un eveniment – nu este nevoie de un Principiu al Incertitudinii!

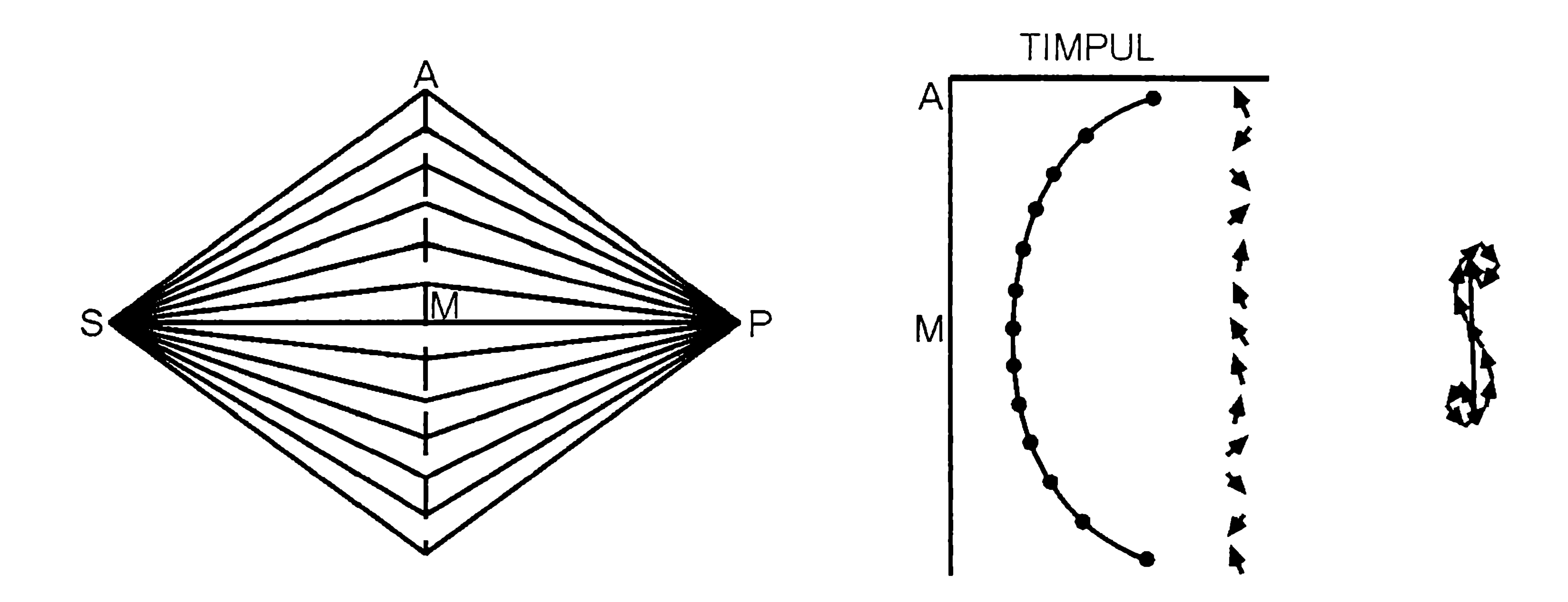


Figura 35. Pentru simplificarea analizării tuturor drumurilor posibile de la S la P, le luăm în discuție doar pe cele alcătuite din câte două segmente de dreaptă (într-un singur plan). Efectul este acelaşi ca şi în cazul real, mai complex: avem de-a face cu o curbă a timpului prezentând un minim, acolo de unde provine cea mai mare parte a contribuției la săgeata finală.

Ei bine, prin apă lumina se propagă mai lent decât prin aer; la fel şi prin sticlă (care este mult mai uşor de prelucrat decât apa!). Deci, dacă pe parcursul drumului cel mai scurt, cel care trece prin punctul M, intercalăm un strat de sticlă de grosime foarte bine determinată, putem face ca timpul necesar parcurgerii acestui drum să fie absolut egal cu cel pentru drumul prin A. Drumurile vecine cu cel ce trece prin M, care sunt doar cu un pic mai lungi, nu vor necesita un strat de sticlă chiar la fel de gros (a se vedea Figura 36). Cu cât ne apropiem de punctul A, cu atât trebuie să intercalăm mai puțină sticlă pentru a încetini propagarea luminii. Calculând cu atenție şi introducând exact grosimea de sticlă necesară, putem compensa timpii necesari luminii de-a lungul tuturor drumurilor, şi putem face ca toți aceştia să fie egali. Dacă desenăm săgetuțele pentru fiecare manieră în care se poate propaga lumina, descoperim că am reuşit să le orientăm pe toate la fel – şi există, efectiv, *milioane* de săgeți minuscule – şi astfel rezultatul pe ansamblu este unul absolut neaşteptat: o săgeată finală cât se poate de lungă! Ştiți, desigur, la ce mă refer: este vorba despre o lentilă convergentă. Aranjând în aşa fel lucrurile încât toate intervalele de timp să fie egale, noi putem focaliza lumina – putem face ca

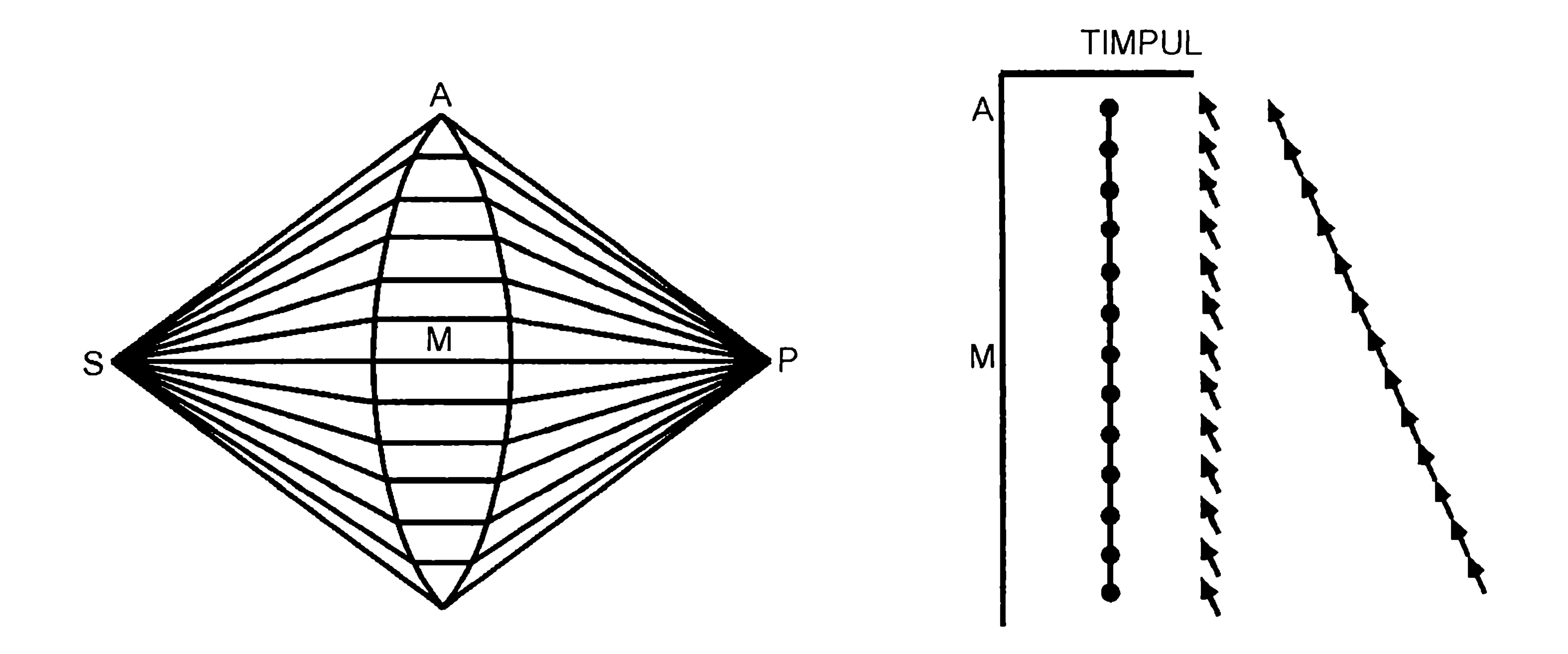


Figura 36. Putem să-i jucăm Naturii o „festă", încetinind lumina care o ia pe drumurile mai scurte: se intercalează un strat de sticlă de grosime corespunzătoare, astfel încât parcurgerea oricărui drum să necesite exact acelaşi interval de timp. Aceasta face ca toate săgetuţele să fie orientate în aceeaşi direcţie şi să dea naştere unei ditamai săgeţi finale - unei lumini intense! O astfel de bucată de sticlă, menită să mărească foarte mult probabilitatea ca lumina să ajungă de la sursă la un anumit punct singular din spaţiu, se numeşte lentilă convergentă

probabilitatea ca lumina să ajungă într-un anumit punct să fie foarte mare, iar probabilitatea să ajungă oriunde altundeva să fie foarte mică.

Am făcut uz de aceste exemple pentru a vă prezenta modul în care teoria electrodinamicii cuantice, care la început arată ca o idee absurdă, fără cauzalitate, fără nici un mecanism lăuntric, complet ruptă de realitate, conduce în final la efecte ce vă sunt familiare: lumina ricoşând de o oglindă, lumina frângându-se atunci când trece din aer în apă, lumina focalizându-se printr-o lentilă, etc. Teoria mai generează şi efecte pe care se poate să nu le fi observat vreodată, cum ar fi cel dat de reţeaua de difracţie şi altele. În fapt, electrodinamica cuantică explică în continuare cu succes *toate* fenomenele legate de lumină.

V-am prezentat nişte exemple cu privire la felul în care se calculează probabilitatea unui eveniment ce se poate petrece în *maniere alternative*: se desenează câte o săgeată pentru fiecare mod în care se

poate întâmpla evenimentul, şi se adună săgeţile. „Adunarea săgeţilor" vrea să spună că ele sunt plasate cap la cap şi că se trasează o „săgeată finală". Pătratul lungimii ei reprezintă probabilitatea evenimentului.

În scopul de a vă oferi posibilitatea să simţiţi cât mai deplin gustul teoriei cuantice, aş dori acum să vă prezint maniera în care fizicienii calculează probabilitatea evenimentelor compuse - a evenimentelor ce pot fi reduse la un număr de paşi, sau care constau dintr-un număr de lucruri ce se pot întâmpla în mod independent.

Un exemplu de eveniment compus se poate obţine dacă modificăm primul nostru experiment, cel în care proiectam fotoni roşii pe o suprafaţă singulară de sticlă şi măsuram reflexia parţială. În loc să plasăm fotomultiplicatorul în punctul A, haideţi să punem acolo un paravan cu o gaură în el (a se vedea Figura 37), care să lase să treacă fotonii ce ajung în A. Apoi, să aşezăm în B o placă de sticlă şi să montăm fotomultiplicatorul în punctul C. Cum determinăm probabilitatea ca un foton să ajungă de la sursă la C?

Putem gândi acest eveniment ca o secvenţa de doi paşi. Pasul 1: fotonul ajunge de la sursă la punctul A, prin reflexie pe suprafaţa singulară de sticlă. Pasul 2: fotonul se deplasează de la A la fotomultiplicatorul din C, reflectându-se pe placa de sticlă B. Fiecărui pas îi corespunde o săgeată finală - o „*amplitudine*" (voi folosi cele două cuvinte deopotrivă) - ce poate fi calculată potrivit regulilor învăţate până aici. Amplitudinea pentru primul pas are lungimea egală cu 0,2 (pătratul ei, probabilitatea de reflexie pe o suprafaţă singulară de sticlă, are valoarea 0,04). Săgeata corespunzătoare este îndreptată într-o anumită direcţie - să zicem, înspre ora 2, cum ne uităm la ceas (a se vedea Figura 37).

Pentru a calcula amplitudinea corespunzătoare celui de-al doilea pas, vom aşeza cu titlu provizoriu sursa în punctul A şi vom proiecta fotonii înspre lama de sticlă de deasupra. Desenăm săgeţile corespunzătoare reflexiilor pe cele două suprafeţe, inferioară şi superioară, şi le adunăm - haideţi să zicem că săgeata finală are lungimea 0,3 şi este orientată la ora 5.

Acuma, cum combinăm noi cele două săgeţi pentru a trasa amplitudinea întregului eveniment? Interpretăm fiecare săgeată într-un nou fel: ca pe nişte instrucţiuni referitoare la o *contracţie* şi o *rotire*.

În exemplul de faţă, prima amplitudine are lungimea 0,2 şi este orientată la ora 2. Dacă pornim de la o „săgeată unitate" - o săgeată cu lungimea 1, orientată drept în sus - putem *comprima* săgeata până se ajunge la lungimea 0,2, şi o putem *roti* până arată ora 2. Amplitudinea

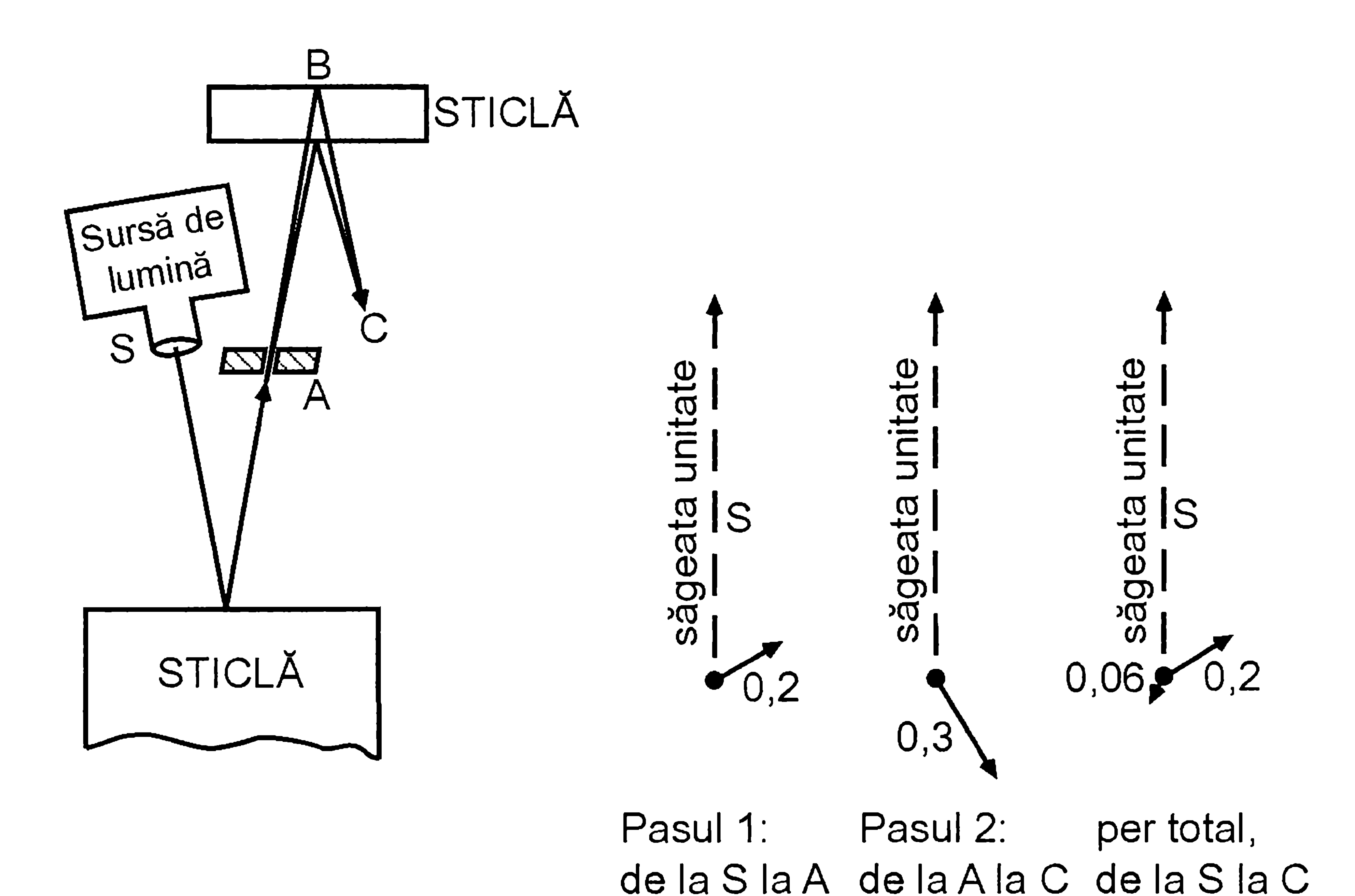


Figura 37. Un eveniment compus poate fi analizat ca o succesiune de paşi. În acest exemplu, drumul unui foton de la S la C poate fi împărțit în doi paşi: 1) fotonul ajunge din S în A, şi 2) fotonul ajunge din A în C. Fiecare pas poate fi analizat separat, generând câte o săgeată ce poate fi privită într-un nou fel: ca o săgeată unitate (o săgeată cu lungimea 1, orientată înspre ora 12) care a suferit o contracție şi o rotire. În acest exemplu, pentru pasul 1, contracția şi rotirea sunt în proporție de 0,2 şi respectiv înspre ora 2, iar pentru pasul 2, ele sunt în proporție de 0,3 şi respectiv înspre ora 5. Pentru a obține amplitudinea succesiunii de paşi, aplicăm în mod consecutiv cele două contracții şi cele două rotiri: săgeata unitate este comprimată şi rotită până ajunge de lungime 0,2 şi orientată la ora 2, iar săgeata astfel rezultată este la rândul ei comprimată şi rotită (ca şi când ar fi o săgeată unitate) ajungându-se în final la lungimea 0,06 şi orientarea înspre ora 7. Acest procedeu de comprimări şi rotiri succesive se numeşte „înmulțirea“ săgeților.

pentru al doilea pas poate fi gândită ca o contracție a săgeții unitate de la lungimea 1 la lungimea 0,3, şi o rotire a ei de la ora 12 la ora 5.

Acuma, pentru a combina amplitudinile ambilor paşi, comprimăm săgeata unitate până când ajunge la lungimea 0,2 şi o rotim de la ora 12 la ora 2; apoi, o comprimăm mai departe, de la lungimea 0,2 până la trei zecimi din această lungime, şi o rotim mai departe, cu cantitatea cuprinsă între ora 12 şi ora 5 - adică, o rotim de la ora 2 la ora 7. Săgeata rezultantă are lungimea 0,06 şi arată spre ora 7. Ea reprezintă o probabilitate egală cu 0,06 ridicat la pătrat, adică 0,0036.

Dacă observăm săgețile cu atenție, sesizăm că rezultatul comprimării şi rotirii succesive de două ori a săgeții unitate, este acelaşi ca în cazul adunării unghiurilor (ora 2 + ora 5) şi înmulțirii lungimilor (0,2 × 0,3). Este uşor de înțeles de ce adunăm unghiurile: unghiul unei săgeți este determinat de cantitatea cu care se roteşte acul cronometrului imaginar. Deci, cantitatea totală cu care se roteşte acesta în cei doi paşi succesivi este pur şi simplu suma cantităților cu care el se roteşte la fiecare pas în parte.

Motivul pentru care numim noi acest procedeu „înmulțirea săgeților" este unul care reclamă explicații ceva mai amănunțite, dar este interesant. Haideți pentru moment să privim operația de înmulțire din punctul de vedere al grecilor antici (partea aceasta nu are vreo legătură cu prelegerea propriu-zisă). Grecii antici urmăreau să utilizeze numere nu neapărat întregi, şi, ca urmare, ei le reprezentau prin segmente de dreaptă. Orice număr poate fi exprimat ca o *transformare* a segmentului unitate - o comprimare sau o alungire a acestuia. De exemplu, dacă segmentul A reprezintă segmentul unitate (a se vedea Figura 38), atunci segmentul B reprezintă numărul 2, iar segmentul C reprezintă numărul 3.

Acuma, cum înmulțim noi 3 × 2? Aplicăm transformările succesiv: pornind de la segmentul A ca segment unitate, îl alungim mai întâi de 2 ori, iar apoi încă de 3 ori (sau îl alungim mai întâi de 3 ori, iar apoi încă de 2 ori - ordinea nu contează). Rezultatul este segmentul D, a cărui lungime reprezintă numărul 6. Dar înmulțirea 1/3 × 1/2? Luând acum segmentul D ca segment unitate, îl comprimăm mai întâi la jumătate (segmentul C), iar apoi la o treime din lungimea obținută. Rezultatul este segmentul A, care reprezintă numărul 1/6.

Înmulțirea săgeților funcționează la fel (a se vedea Figura 39). Aplicăm săgeții unitate transformări succesive - doar că transformarea unei *săgeți* implică *două* operații: o comprimare şi o rotire. Pentru a înmulți săgeata V cu săgeata W, comprimăm şi rotim săgeata unitate cu cantitățile preconizate pentru V, iar apoi o comprimăm şi o rotim

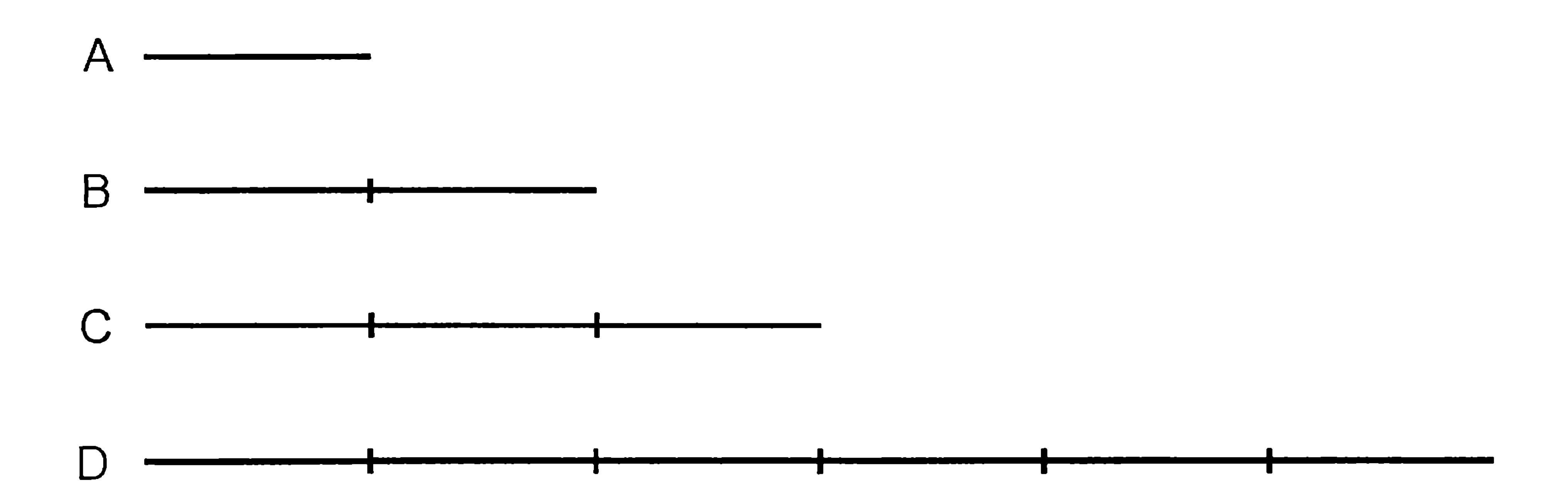


Figura 38. Putem exprima orice număr ca o transformare aplicată segmentului unitate, fie alungindu-l, fie comprimându-l. Dacă A este segmentul unitate, atunci B reprezintă numărul 2 (alungire), iar C reprezintă numărul 3 (alungire). Înmulțirea segmentelor se realizează prin transformări succesive. De exemplu, înmulțirea lui 3 cu 2 înseamnă că segmentul unitate este mai întâi alungit de 3 ori, iar apoi de încă două ori, rezultatul obținut astfel fiind o alungire de 6 ori (segmentul D). Dacă luăm pe D ca segment unitate, atunci segmentul C reprezintă numărul 1/2 (comprimare), iar segmentul B reprezintă numărul 1/3 (comprimare). Înmulțirea lui 1/2 cu 1/3 înseamnă că segmentul unitate D este comprimat la jumătate din lungimea sa, iar apoi, încă o dată, la o treime din cât era, rezultatul obținut astfel (segmentul A) reprezentând o comprimare la o șesime din lungimea inițială.

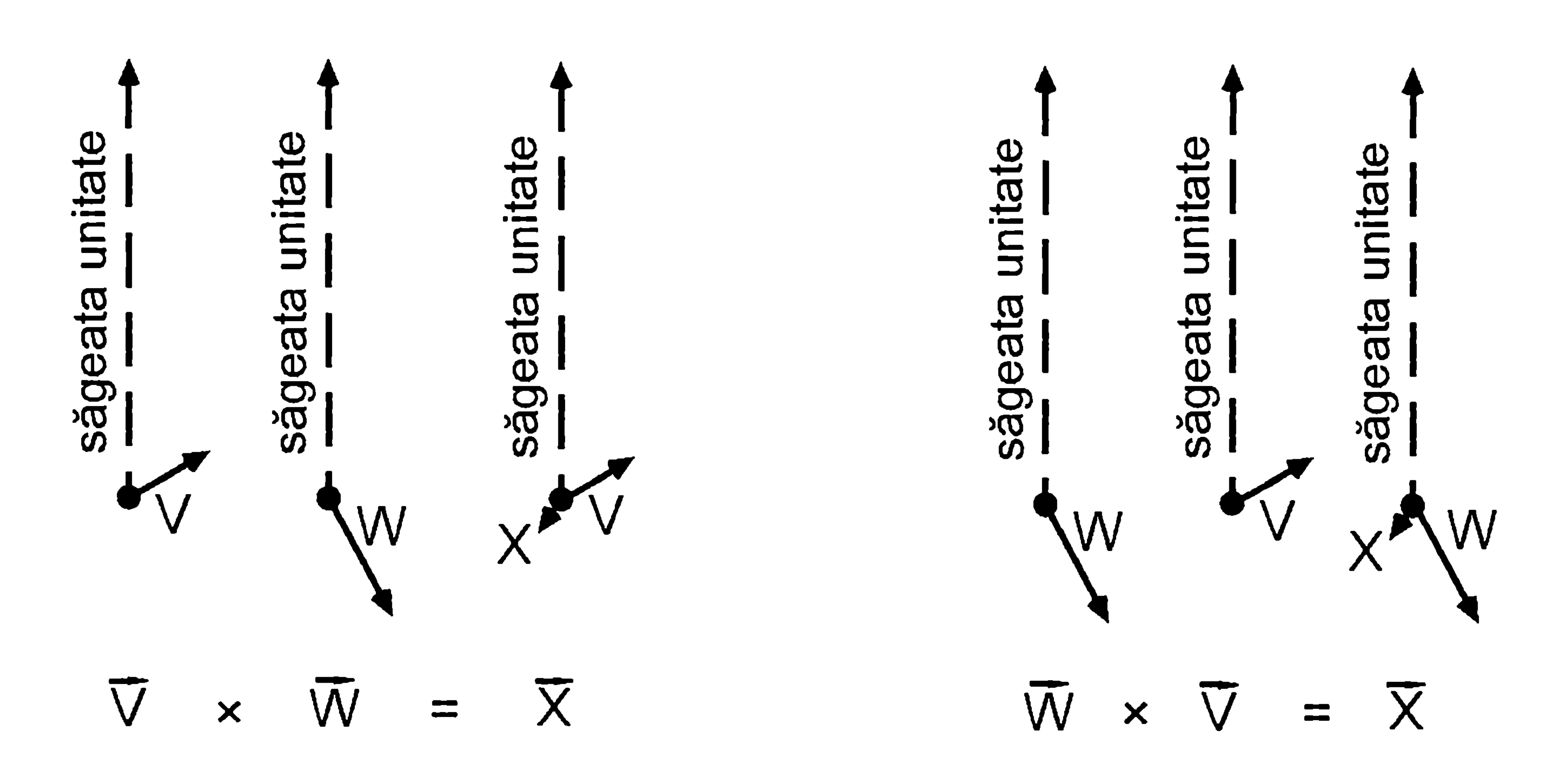


Figura 39. Matematicienii au descoperit că înmulțirea săgeților poate fi și ea exprimată ca o serie de transformări succesive ale unei săgeții unitate (pentru scopurile noastre, este vorba de comprimări și rotiri). La fel ca în cazul înmulțirii obișnuite, ordinea nu contează: rezultatul, săgeata X, poate fi obținută atât înmulțind săgeata V cu săgeata W, cât și înmulțind săgeata W cu săgeata V.

încă o dată, cu cantitățile preconizate pentru W - din nou, ordinea nu contează. Deci, înmulțirea săgeților ascultă de aceeași regulă a transformărilor succesive care se aplică și numerelor obișnuite.[4]

Haideți să ne întoarcem la primul experiment din prima prelegere - reflexia parțială pe o suprafață singulară - și să privim lucrurile din perspectiva ideii de pași succesivi (a se vedea Figura 40). Putem descompune drumul corespunzător reflexiei în trei pași: 1) lumina coboară de la sursă până la sticlă; 2) lumina este reflectată de sticlă; 3) lumina urcă de la sticlă la detector. Fiecare pas poate fi considerat drept un anumit factor de compresie și un anumit factor de rotație a săgeții unitate.

Dacă vă aduceți aminte, în prima prelegere nu am luat în considerare *toate* modurile în care lumina s-ar putea reflecta pe suprafața sticlei, lucru ce ar necesita desenarea și adunarea unei puzderii de săgetuțe. Pentru a evita toată această detaliere, am lăsat impresia că lumina coboară într-un punct anume de pe suprafața sticlei - că ea nu se împrăștie. Atunci când lumina se propagă dintr-un punct în altul, în realitate ea se împrăștie (numai dacă nu cumva este păcălită de o

---

[4] Matematicienii au încercat să găsească toate obiectele posibile care să asculte de regulile algebrice (A + B = B + A, A × B = B × A și așa mai departe). Regulile fuseseră la origine stabilite pentru numerele întregi pozitive, cu scopul de a număra lucruri precum mere ori indivizi. Numerele au suferit îmbunătățiri prin inventarea lui zero, a fracțiilor, a numerelor iraționale - numerele ce nu pot fi exprimate ca raport de două numere întregi - și a numerelor negative. Ele au continuat să asculte de regulile inițiale ale algebrei. La început, unele din numerele inventate de matematicieni au pus probleme oamenilor - ideea de jumătate de individ era greu de conceput - dar în ziua de astăzi nu mai este nicio dificultate: nimeni nu resimte vreo reținere morală și nu este încercat de vreo indispoziție atunci când aude vorbindu-se de o medie de 3,2 indivizi pe kilometru pătrat. Dimpotrivă, lumea știe ce vrea să zică numărul 3,2: dacă se înmulțește 3,2 cu 10, se obține 32. Astfel, unele din lucrurile care satisfac regulile algebrice pot fi interesante pentru matematicieni chiar dacă ele nu reprezintă întotdeauna o situație reală. Săgețile dintr-un plan pot fi „adunate" prin așezarea lor una în continuarea celeilalte, sau pot fi „înmulțite" prin comprimări și rotiri succesive. Cum aceste săgeți ascultă de aceleași reguli ale algebrei ca și numerele obișnuite, matematicienii le numesc numere. Dar, pentru a le deosebi de numerele clasice, ei le numesc „numere complexe". Pentru aceia dintre dumneavoastră care au studiat suficientă matematică încât să fi ajuns la numerele complexe, ar fi trebuit să spun în felul următor: „Probabilitatea unui eveniment este valoarea absolută a pătratului unui număr complex. Atunci când un eveniment se poate petrece în maniere alternative, numerele complexe se adună; atunci când el se poate întâmpla numai ca urmare a unei succesiuni de pași, numerele complexe se înmulțesc." Chiar dacă în felul acesta lucrurile ar suna mai impresionant, nu aș afirma cu nimic mai mult decât am făcut-o anterior - pur și simplu aș folosi un alt limbaj.

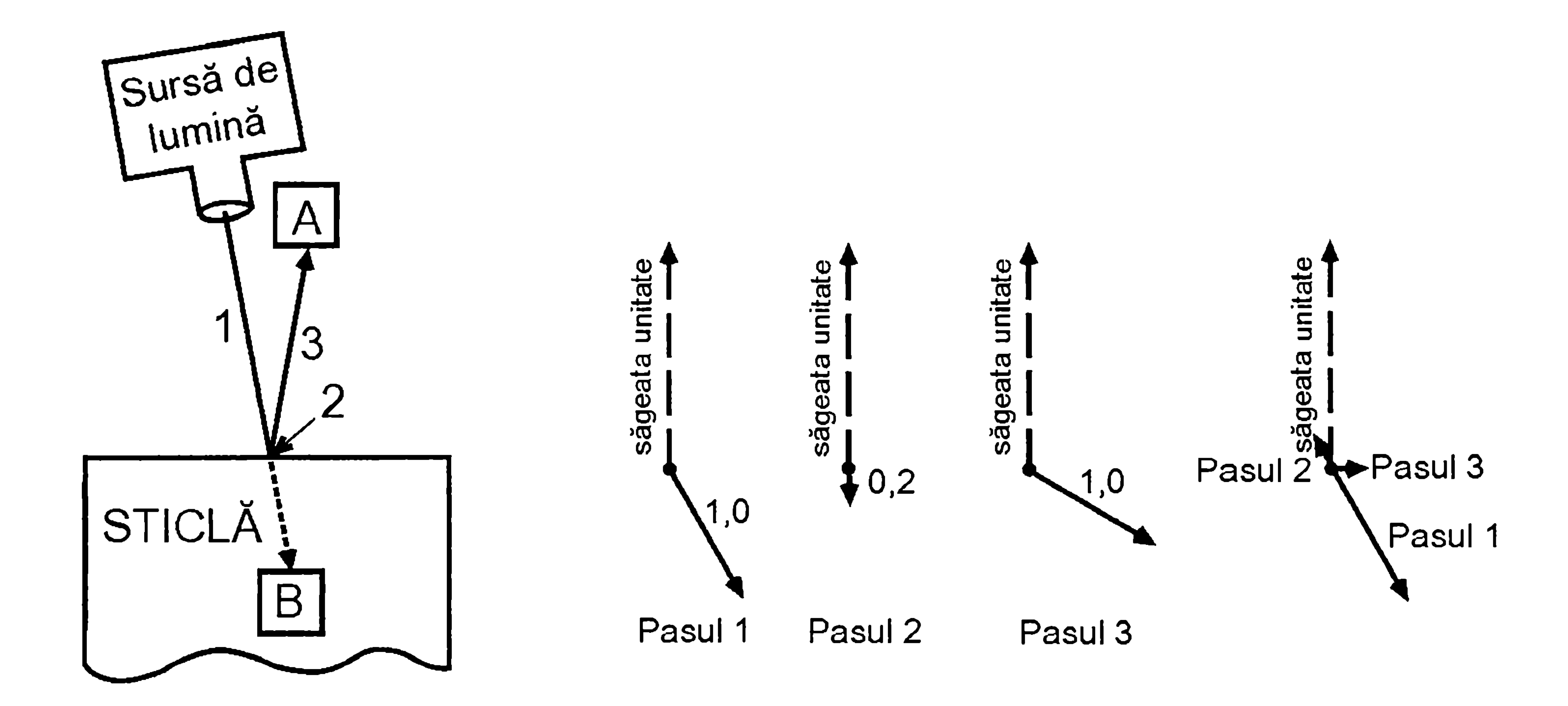


Figura 40. Reflexia pe o suprafață singulară poate fi descompusă în trei pași, fiecare corespunzând unei comprimări și/sau unei rotiri a săgeții unitate. Rezultatul de ansamblu, o săgeată de lungime 0,2 îndreptată într-o direcție oarecare, este același de mai înainte, dar acum metoda noastră de analiză este mai detaliată.

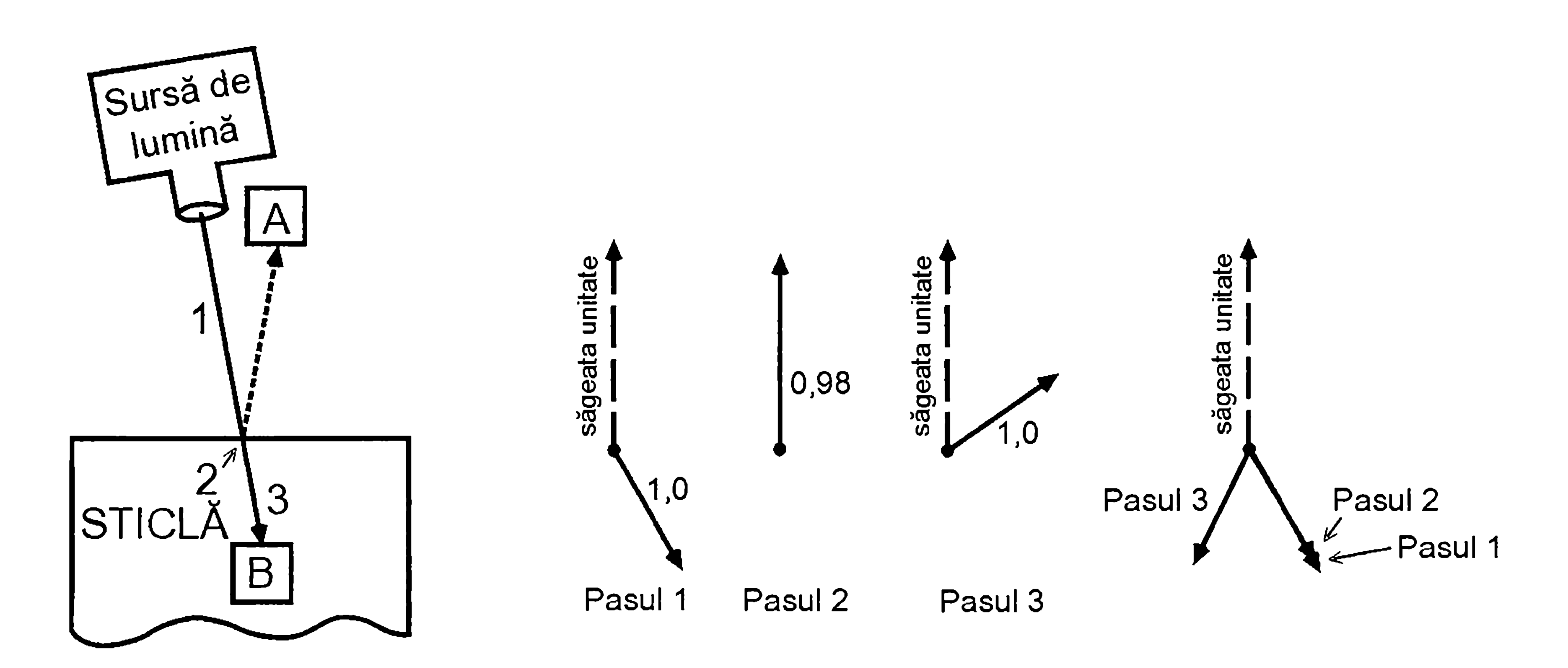


Figura 41. Transmisia luminii de către o suprafață singulară poate fi de asemenea descompusă în trei pași, fiecare caracterizat de o anumită contracție și/sau o anumită rotire. O săgeată cu lungimea de 0,98 are un pătrat egal cu aproximativ 0,96, ceea ce înseamnă o probabilitate de transmisie de 96% (aceasta, dimpreună cu probabilitatea de 4% pentru reflexie, dau socoteală în proporție de 100% de comportarea luminii.

lentilă) şi asociat acestui lucru se înregistrează o anumită contracţie a săgeţii unitate. Totuşi, pentru moment aş dori să rămânem la perspectiva simplificată în care lumina nu se împrăştie, şi ca atare se cuvine să neglijăm comprimarea respectivă. De asemenea, din moment ce lumina nu se împrăştie, este adecvat să presupunem că orice foton care părăseşte sursa, ajunge fie în A, fie în B.

Aşadar, în cadrul primului pas nu avem contracţie, dar există o rotire - ea corespunde cantităţii cu care se roteşte acul cronometrului imaginar ce măsoară timpul necesar fotonului să se deplaseze de la sursă la suprafaţa superioară a sticlei. În exemplul de faţă, săgeata corespunzătoare primului pas sfârşeşte prin a rămâne cu lungimea 1, şi orientată într-o direcţie oarecare - să zicem, înspre ora 5.

Al doilea pas îl constituie reflectarea fotonului de către sticlă. Aici, avem o comprimare sesizabilă - de la 1 la 0,2 - şi o rotire cu o jumătate de tură. (Aceste valori par acum arbitrare: ele depind de materialul sticlos ori de altă natură, pe care se reflectă lumina. În cea de-a treia prelegere vă voi explica acest lucru!) Deci, pasul doi este caracterizat de o amplitudine cu lungimea 0,2, şi de o direcţionare înspre ora 6 (jumătate de rotaţie).

Ultimul pas este reprezentat de deplasarea fotonului de la suprafaţa de sticlă până sus la detector. Aici, ca şi în cazul primului pas, nu avem contracţie, dar există o rotire - haideţi să zicem că distanţa corespunzătoare este ceva mai mică, şi că săgeata se orientează înspre ora 4.

Acum să „înmulţim" pe rând cele trei săgeţi (adunăm unghiurile şi înmulţim lungimile). Efectul de ansamblu al paşilor 1, 2 şi 3 - 1) o rotire; 2) o contracţie şi o rotire cu jumătate de tură; 3) din nou o rotire - este acelaşi cu cel din prima prelegere. Rotirea corespunzătoare paşilor 1 şi 3 (ora 5 + ora 4) este aceeaşi ca valoare cu cea pe care am obţinut-o atunci când am lăsat cronometrul să meargă pe parcursul întregii distanţe (ora 9). Jumătatea de tură suplimentară face ca săgeata să arate în sens opus acului cronometrului, exact aşa cum se întâmpla în prima prelegere, iar contracţia în proporţie de 0,2 de la cel de-al doilea pas, conduce la o săgeată al cărei pătrat ne dă procentul de 4% reflexie parţială găsit pentru cazul unei suprafeţe singulare.

În cadrul acestui experiment, există o chestiune pe care nu am abordat-o în prima prelegere: cum stau lucrurile cu fotonii care ajung în B - cei care sunt transmişi de suprafaţa de sticlă? Amplitudinea pentru un foton care ajunge în B trebuie să aibă o lungime în jurul a 0,98, căci 0,98 × 0,98 = 0,9604, aproape de 96%. Şi aceasta poate fi analizată prin descompunere în mai mulţi paşi (a se vedea Figura 41).

Primul pas este acelaşi ca în cazul drumului până în A - fotonul coboară de la sursa de lumină la suprafaţa sticlei - şi săgeata unitate se roteşte către ora 5.

Al doilea pas îl constituie trecerea fotonului prin suprafaţa sticlei: la transmisie nu avem rotire, ci doar o uşoară contracţie - până la 0,98.

Al treilea pas - mersul fotonului în interiorul sticlei - implică o rotire adiţională, fără contracţie.

Rezultatul net este o săgeată de lungime 0,98, orientată într-o direcţie oarecare, pătratul ei reprezentând probabilitatea ca fotonul să ajungă în punctul B - 96%.

Haideţi acum să mai urmărim o dată reflexia parţială pe două suprafeţe. Reflexia pe faţa superioară este aceeaşi ca pentru o suprafaţă singulară, deci cei trei paşi corespunzători sunt aceiaşi pe care i-am discutat un pic mai devreme (a se vedea Figura 40).

Reflexia pe faţa inferioară poate fi descompusă în şapte paşi (a se vedea Figura 42). Ea implică o rotire cu o cantitate egală cu cea cu care se roteşte acul cronometrului atunci când măsoară timpul

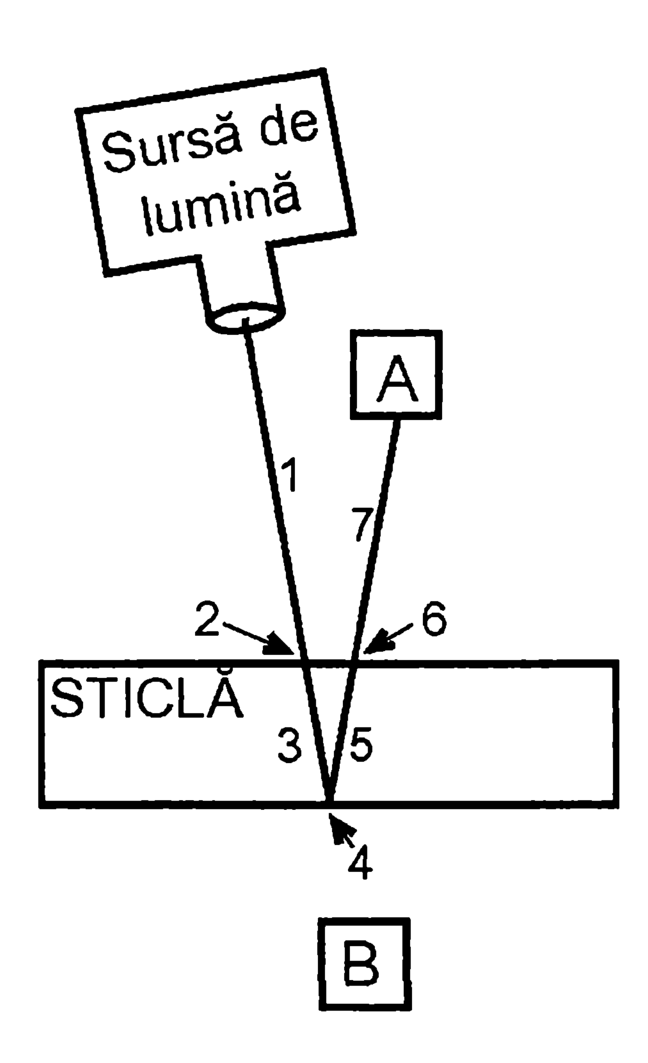


Figura 42. Reflexia pe faţa inferioară a unei lame de sticlă poate fi descompusă în şapte paşi. Paşii 1, 3, 5 şi 7 implică doar rotiri; paşii 2 şi 6 implică fiecare câte o contracţie în proporţie de 0,98; iar pasul 4 implică o contracţie în proporţie de 0,2. Rezultatul îl constituie o săgeată cu lungimea 0,192 - valoare care în prima prelegere a fost aproximată cu 0,2 - rotită cu un unghi echivalent cantităţii totale cu care s-a rotit acul cronometrului imaginar.

necesar fotonului pentru a parcurge întreaga distanță (pașii 1, 3, 5 și 7), o contracție în proporție de 0,2 (pasul 4) și două contracții în proporție de 0,98 (pașii 2 și 6). Săgeata rezultantă sfârșește în aceeași direcție ca mai înainte, iar lungimea ei este circa 0,192 (0,98 × 0,2 × 0,98), valoare pe care în prima prelegere am aproximat-o cu 0,2.

În concluzie, iată regulile reflexiei și transmisiei luminii de către sticlă: 1) reflexia din aer înapoi în aer (pe fața superioară) implică o contracție în proporție de 0,2 și o rotire cu jumătate de tură; 2) reflexia din sticlă înapoi în sticlă (pe fața inferioară) implică tot o contracție în proporție de 0,2, dar fără rotire; 3) transmisia din aer în sticlă, sau din sticlă în aer, implică în ambele cazuri doar o contracție în proporție de 0,98, fără rotire.

Poate că nu este cazul să insist mai mult de atât, dar nu pot să nu vă prezint încă un exemplu drăguț de cum stau lucrurile și de cum sunt ele analizate prin intermediul acestor reguli a pașilor succesivi. Haideți să mutăm detectorul într-un punct de sub sticlă și să considerăm ceva despre care nu am pomenit în prima prelegere – probabilitatea de transmisie prin două suprafețe de sticlă.

Desigur, cunoașteți răspunsul: pur și simplu, probabilitatea ca un foton să ajungă în B este egală cu 100% minus probabilitatea ca el să ajungă în A, pe care am determinat-o în prealabil. Astfel, dacă am găsit că șansa ca fotonul să ajungă în A este de 7%, atunci șansa ca el să ajungă în B trebuie să fie 93%. Și, pe măsură ce probabilitatea de ajungere în A variază de la zero la 8%, și mai departe până la 16%, (în funcție de diferitele grosimi ale sticlei), probabilitatea de ajungere în B se modifică de la 100% la 92% și până la 84%.

Acesta este răspunsul corect, însă noi ne așteptăm să putem calcula *toate* probabilitățile prin ridicarea la pătrat a unor săgeți finale. Cum calculăm săgeata amplitudinii corespunzătoare transmisiei printr-o lamă de sticlă? Cum face aceasta să varieze atât de potrivit ca lungime, încât să se coreleze în toate situațiile cu probabilitatea ajungerii în A, pentru ca suma lor să dea mereu exact 100%? Haideți să privim lucrurile mai în detaliu (a se vedea Figura 43).

Ajungerea unui foton de la sursă la detectorul din punctul B, sub stratul de sticlă, implică cinci pași. Să comprimăm și să rotim săgeata unitate, pe măsura parcurgerii acestora.

Primii trei pași sunt aceiași ca în exemplul anterior: fotonul se deplasează de la sursă la sticlă (rotire, fără contracție); fotonul este transmis de suprafața superioară (contracție în proporție de 0,98, fără rotire); fotonul se deplasează prin sticlă (rotire fără contracție).

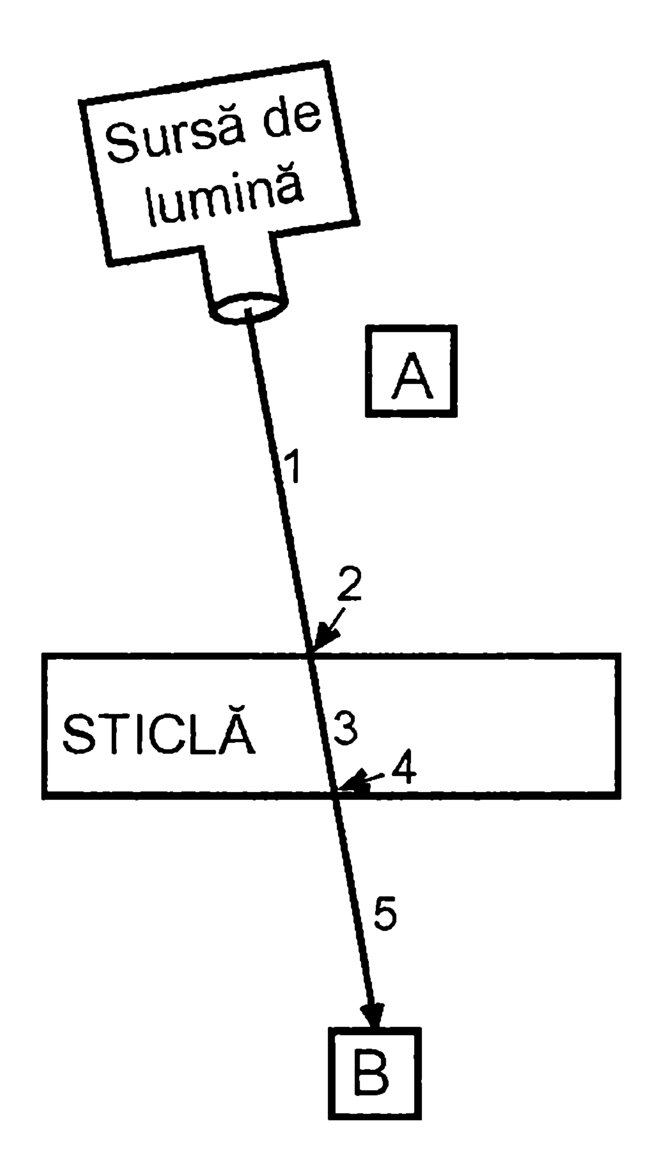


Figura 43. Transmisia prin două suprafețe de sticlă poate fi descompusă în 5 pași. Pasul 2 comprimă săgeata unitate până la 0,98, pasul 4 o mai comprimă o dată până la 0,98 din cât era (aproximativ până la 0,96), iar pașii 1, 3 și 5 implică doar rotiri. Săgeata rezultantă, de lungime 0,96, are pătratul egal cu aproximativ 0,92, ceea ce reprezintă o probabilitate de transmisie prin cele două suprafețe de 92% (aceasta corespunde acelui 8% așteptat pentru reflexie, corect doar „de două ori pe zi"). Atunci când grosimea lamei de sticlă este potrivită pentru a produce o probabilitate de reflexie de 16%, aceasta, dimpreună cu probabilitatea de transmisie de 92%, dau socoteală pentru un procent de lumină de 108%! Ceva nu este în regulă cu această analiză!

Al patrulea pas - fotonul traversează suprafața inferioară - este identic cu pasul 2 în ceea ce privește rotirea și comprimarea: nu avem rotire, dar avem o contracție în proporție de 0,98 din deja existentul 0,98, deci săgeata are o lungime de aproximativ 0,96.

În fine, fotonul se deplasează din nou prin aer, coborând până la detector - aceasta înseamnă o rotire suplimentară, fără vreo altă comprimare. Rezultatul este o săgeată de lungime 0,96, orientată într-o direcție oarecare, determinată de rotirile succesive ale acului cronometrului.

O săgeată a cărei lungime este 0,96, reprezintă o probabilitate de aproximativ 92% (0,96 ridicat la pătrat), ceea ce înseamnă că din fie-

care 100 de fotoni ce părăsesc sursa, în punctul B ajung în medie 92. Aceasta înseamnă, de asemenea, că 8% din fotoni sunt reflectați de cele două suprafețe și ajung în A. Însă, în prima prelegere, noi am descoperit că reflexia de 8% pentru două suprafețe de sticlă este corectă doar uneori („de două ori pe zi") - am descoperit că, în realitate, reflexia pe două suprafețe fluctuează într-un ciclu de la zero la 16%, pe măsură ce grosimea stratului de sticlă tot crește. Ce se întâmplă atunci când sticla are exact grosimea potrivită pentru a produce o reflexie parțială de 16%? Pentru fiecare 100 de fotoni ce părăsesc sursa, 16 ajung în punctul A și 92 ajung în punctul B, ceea ce înseamnă că am dat socoteală de 108% din lumină - oribil! Ceva este în neregulă.

Am uitat să considerăm *toate* căile pe care lumina ar putea ajunge în B! De pildă, ea ar putea să ricoșeze de fața inferioară și să o ia în sus prin sticlă, ca și când s-ar îndrepta înspre punctul A, dar să se reflecte pe suprafața superioară și să coboare înapoi în B (a se vedea Figura 44). Acest drum necesită nouă pași. Haideți să vedem ce se întâmplă pe rând cu săgeata unitate, pentru fiecare pas făcut de lumină (nu vă îngrijorați, ea nu face decât să se contracte și să se rotească!).

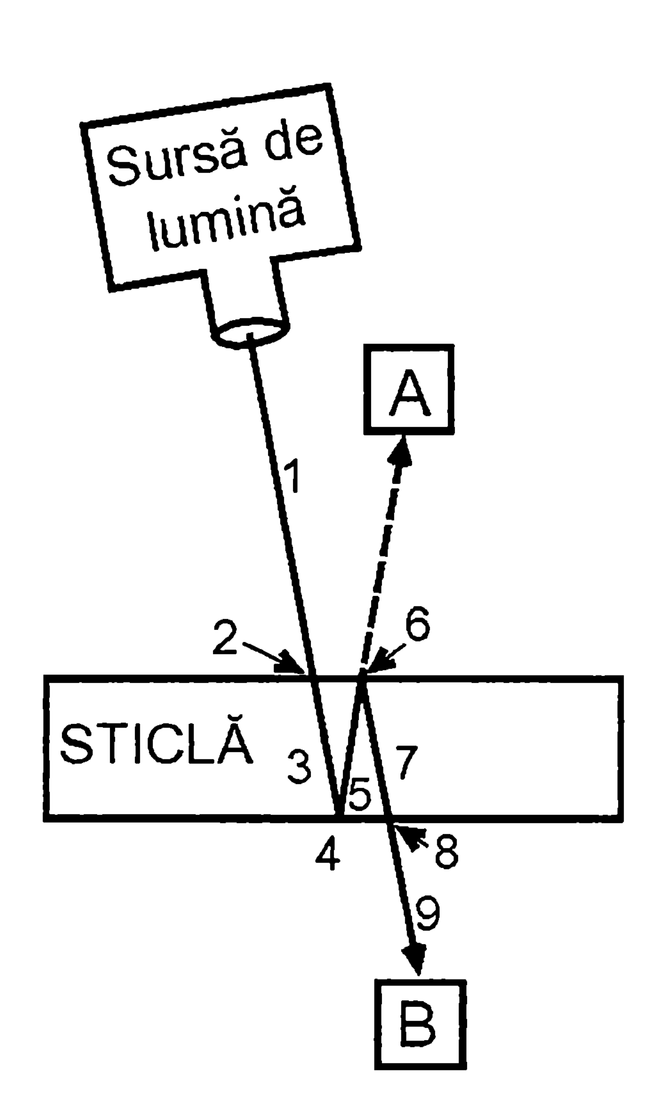


Figura 44. Pentru a face calculele mai precise, trebuie considerat și un alt mod în care lumina ar putea fi transmisă de cele două suprafețe. Acest drum implică două contracții în proporție de 0,98 (pașii 2 și 8) și două în proporție de 0,2 (pașii 4 și 6), rezultând astfel o săgeată de lungime 0,0384 (rotunjită la valoarea 0,04).

La pasul 1 - fotonul coboară prin aer - avem rotire, fără contracție. La pasul 2 - fotonul intră în sticlă - avem contracție în proporție de 0,98, fără rotire. La pasul 3 - fotonul coboară prin sticlă - avem rotire, fără contracție. La pasul 4 - reflexia pe fața inferioară - avem contracție în proporție de 0,2 din 0,98, adică până la 0,196, fără rotire. La pasul 5 - fotonul urcă prin sticlă - avem rotire, fără contracție. La pasul 6 - fotonul ricoșează de fața superioară (de fapt, ea este o față „inferioară", căci fotonul rămâne *în* sticlă) - avem contracție în proporție de 0,2 din 0,196, adică până la 0,0392, fără rotire. La pasul 7 - fotonul coboară încă o dată prin sticlă - avem rotire, fără contracție. La pasul 8 - fotonul traversează fața inferioară - avem contracție în proporție de 0,98 din 0,0392, adică până la 0,0384, fără rotire. În fine, la pasul 9 - fotonul ajunge la detector, prin aer - avem rotire, fără contracție.

Rezultatul tuturor acestor contracții și rotiri îl constituie o amplitudine de lungime 0,0384 - practic, o să o luăm egală cu 0,04 - și rotită cu un unghi corespunzător valorii totale cu care se rotește acul cronometrului atunci când măsoară timpul necesar fotonului pentru parcurgerea acestui drum mai lung. Această săgeată constituie o *a doua* manieră în care lumina poate ajunge de la sursă la B. Acum avem două căi alternative, deci cele două săgeți - săgeata de lungime 0,96, corespunzătoare drumului mai direct, și săgeata de lungime 0,4, corespunzătoare drumului ceva mai lung - trebuie *adunate* pentru a obține săgeata finală.

În general, cele două săgeți nu sunt orientate în aceeași direcție, din cauză că varierea grosimii sticlei modifică unghiul dintre săgeata de lungime 0,04 și cea de lungime 0,96. Dar fiți atenți cât de bine se potrivesc lucrurile: rotirea suplimentară a acului cronometrului corespunzătoare pașilor 3 și 5 (în cazul în care fotonul ar sfârși în punctul A) este egală cu rotirea suplimentară corespunzătoare pașilor 5 și 7 (atunci când fotonul ajunge în B). Aceasta înseamnă că, atunci când cele două săgeți de la reflexie se anulează reciproc, dând reflexie zero, cele două săgeți de la transmisie se întrajutorează, dând o săgeată finală de lungime 0,96 + 0,04, adică 1. Atunci când probabilitatea de reflexie este zero, probabilitatea de transmisie este 100% (a se vedea Figura 45). Iar atunci când cele două săgeți de la reflexie se întrajutorează pentru a produce o amplitudine egală cu 0,4, cele două săgeți de la transmisie se contracarează, producând o amplitudine de lungime 0,96 - 0,04, adică 0,92; atunci când calculele pentru reflexie dau 16%, rezultatul pentru transmisie este de 84% (0,92 ridicat la pătrat). Vedeți cât este de isteață Natura să se asigure că regulile dau socoteală totdeauna de 100% din fotoni?[5]

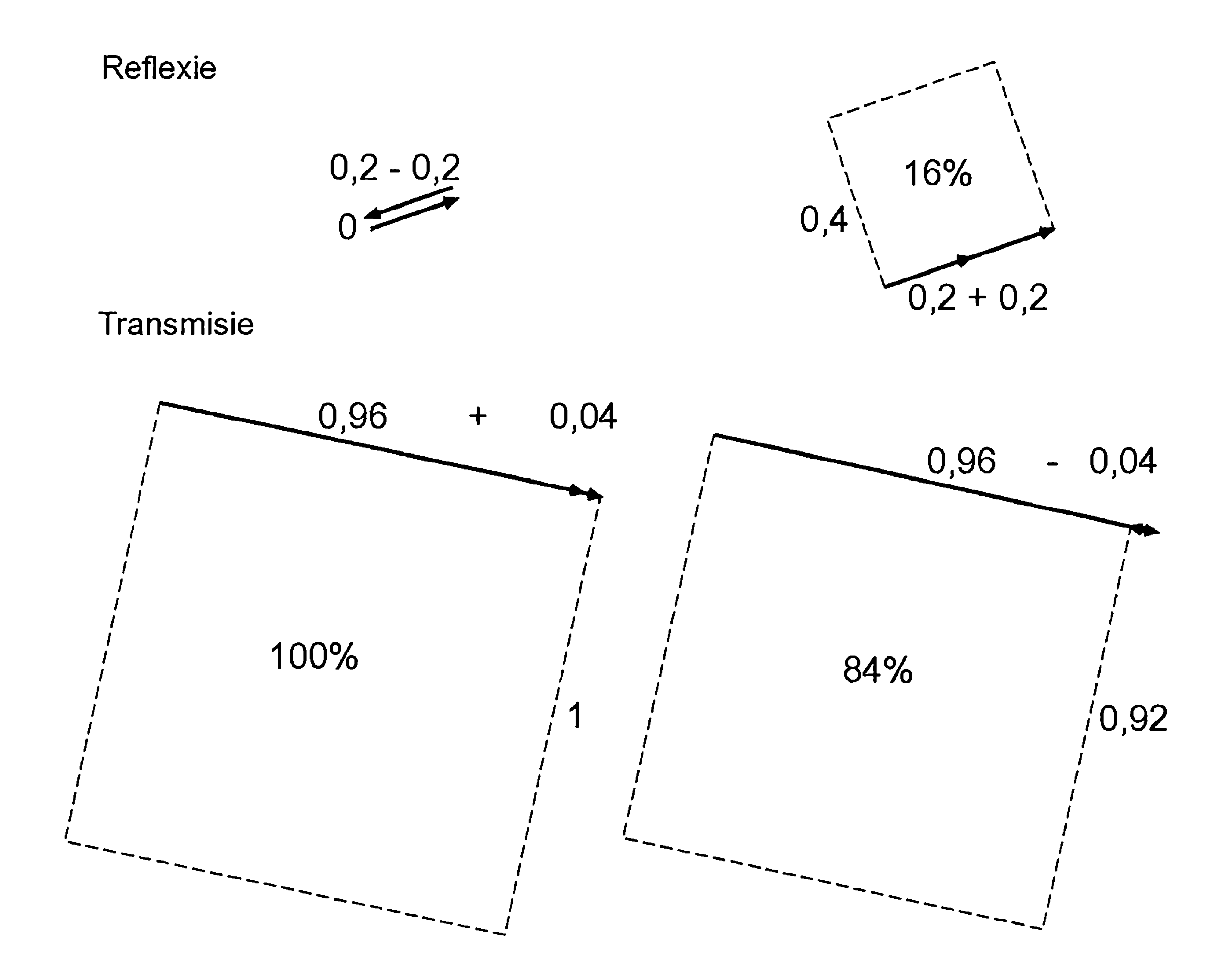


Figura 45. Natura se asigură că de fiecare dată dă socoteală de 100% din lumină. Atunci când grosimea lamei de sticlă are o astfel de valoare încât săgeţile de la transmisie să se sporească reciproc, cele de la reflexie se opun una alteia; atunci când săgeţile de la reflexie conlucrează, cele de la transmisie se contracarează.

[5] Veţi fi băgat de seamă că, pentru a da socoteală de 100% din lumină, am aproximat pe 0,0384 cu 0,04 şi am zis că pătratul lui 0,92 este egal cu 84%. Însă atunci când adunăm *toate* variantele, nu mai trebuie să îi rotunjim pe 0,0384 şi pe 84% - toate frânturile de săgetuţe (reprezentând toate felurile în care lumina se poate propaga) se compensează între ele şi menţin corectitudinea rezultatului. Pentru aceia dintre dumneavoastră cărora le plac astfel de lucruri, iată un alt exemplu de cale pe care lumina ar putea ajunge de la sursă la detectorul din punctul A: o serie de trei reflexii (plus două transmisii), rezultând într-o săgeată finală de lungime 0,98 × 0,2 × 0,2 × 0,2 × 0,98, sau aproximativ 0,008 – o săgeată foarte micuţă (a se vedea Figura 46). Pentru a efectua calculul complet în privinţa reflexiei pe o lamă, ar trebui adunată şi această infimă săgeată, precum şi una încă şi mai minusculă, corespunzătoare la cinci reflexii, şi aşa mai departe.

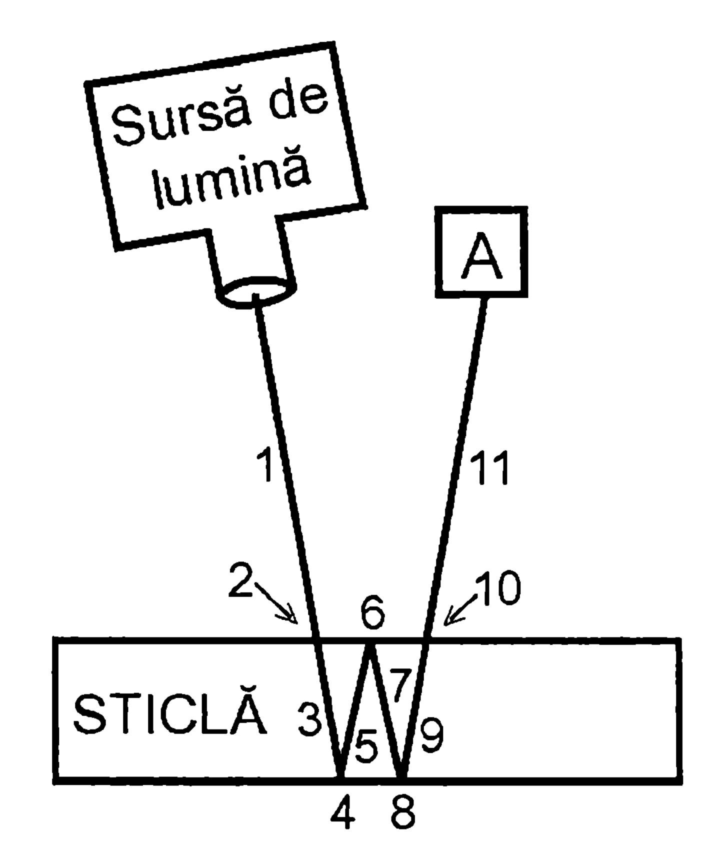


Figura 46. Pentru un calcul şi mai precis, ar trebui luate în considerare încă alte moduri în care lumina se poate reflecta pe o lamă de sticlă. În figura de faţă avem contracţii în proporţie de 0,98 în cadrul paşilor 2 şi 10, şi contracţii în proporţie de 0,2 în cadrul paşilor 4, 6, şi 8. Rezultatul este o săgeată cu lungimea aproximativ 0,008, ce reprezintă o altă alternativă pentru reflexie, şi care, în consecinţă, ar trebui adunată cu celelalte două (cea de lungime 0,2, corespunzătoare feţei superioare, şi cea de lungime 0,192, corespunzătoare feţei inferioare).

În fine, mai înainte de a pune capăt prelegerii, aş dori să vă spun că există o extindere a regulii ce descrie situaţiile în care se înmulţesc săgeţile: săgeţile trebuie înmulţite nu numai în cazul unui eveniment care constă dintr-o succesiune de paşi, ci şi în cazul unui eveniment care constă într-un număr de lucruri ce se petrec concomitent - independent, şi posibil simultan. De exemplu, să presupunem că avem două surse, X şi Y, şi două detectoare, A şi B (a se vedea Figura 47), şi că vrem să calculăm probabilitatea următorului eveniment: după ce X şi Y vor fi emis fiecare câte un foton, în A şi în B se înregistrează câte un foton.

În acest exemplu, fotonii ajung la detector deplasându-se în spaţiu - ei nu sunt nici reflectaţi şi nici transmişi - deci acum ar fi momentul potrivit să nu mai neglijez faptul că lumina se împrăştie pe măsură ce se propagă. Vă prezint acum *regula completă* pentru lumina monocromatică ce se propagă între două puncte din spaţiu - nu avem aici nicio aproximaţie şi nicio simplificare. Iată tot ce trebuie de ştiut în legătură cu propagarea luminii (exceptând fenomenul de polarizare): *unghiul* săgeţii depinde de acul cronometrului imaginar, care se roteşte

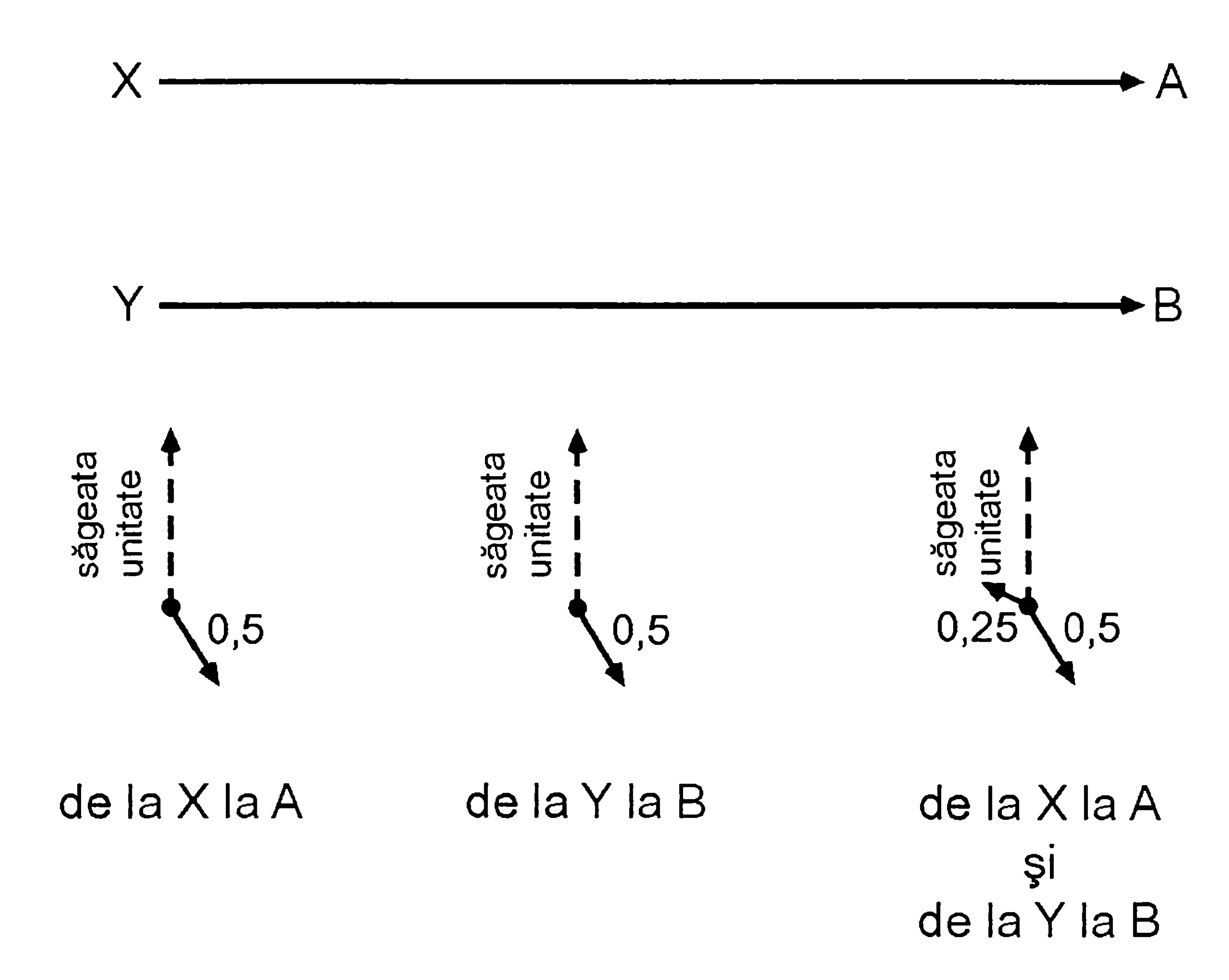


Figura 47. În cazul în care unul din felurile în care se poate petrece un anumit eveniment depinde de un număr de lucruri ce se pot întâmpla în mod independent, amplitudinea corespunzătoare acelei maniere se calculează înmulţind săgeţile caracteristice acelor lucruri independente. În cazul nostru, evenimentul final este: după ce sursele X şi Y emit fiecare câte un foton, fotomultiplicatorii din punctele A şi B produc fiecare câte un clic. Unul din felurile în care s-ar putea petrece acest eveniment, este ca un foton să ajungă din X în A, iar celălalt să ajungă din Y în B (două lucruri independente). Pentru a calcula probabilitatea acestei „prime maniere", se înmulţesc săgeţile corespunzătoare fiecărui lucru independent - fotonul din X în A, respectiv fotonul din Y în B - obţinându-se astfel săgeata pentru această modalitate particulară. (Analiza se continuă în Figura 48.)

de un anumit număr de ori pentru fiecare centimetru parcurs (în funcţie de culoarea fotonului); *lungimea* săgeţii este invers proporţională cu distanţa parcursă de lumină - cu alte cuvinte, săgeata se contractă pe măsură ce lumina merge mai departe.[6]

[6] Această regulă este în concordanţă cu ceea ce se predă la şcoală - faptul că valoarea luminii transmise la o anumită distanţă variază invers proporţional cu pătratul distanţei - deoarece o săgeată ce se comprimă până la jumătate din lungimea ei iniţială, va avea pătratul egal cu un sfert din cât era la început.

Haideți să presupunem că săgeata corespunzătoare drumului de la X la A are lungimea 0,5 și este orientată la ora 5, și că la fel stau lucrurile și pentru săgeata corespunzătoare drumului de la Y la B (a se vedea Figura 47). Înmulțind cele două săgeți, obținem o săgeată finală de lungime 0,25, orientată la ora 10.

Dar stați! Mai există un mod în care s-ar putea petrece acest eveniment: fotonul din X ar putea ajunge în B, iar fotonul din Y ar putea ajunge în A. Fiecare din aceste subevenimente are la rândul său o anumită amplitudine, iar aceste săgeți trebuie și ele desenate și înmulțite, pentru a obține amplitudinea acestui fel anume de producere a evenimentului (a se vedea Figura 48). Cum valoarea contracției variază cu distanța mult mai slab decât rotirea, cele două săgeți au în esență aceeași lungime ca și celelalte, 0,5, însă orientarea lor este complet diferită: acul cronometrului se rotește de 14.000 de ori pentru fiecare centimetru parcurs de lumina roșie, deci chiar și o diferență infimă între distanțe, conduce la o diferență substanțială de cronometrare.

Pentru a obține săgeata finală, se adună amplitudinile corespunzătoare fiecărui mod în care s-ar putea realiza evenimentul. Din moment ce lungimile lor sunt în esență egale, este posibil ca săgețile să se anuleze reciproc, în cazul în care orientările lor sunt opuse. Unghiul dintre săgețile corespunzătoare celor două maniere de producere a evenimentului poate fi modificat prin schimbarea distanței dintre surse sau dintre detectoare: exact ca și în cazul reflexiei parțiale pe două suprafețe, simpla apropiere sau depărtare foarte mică a celor două detectoare unul de altul, poate face ca probabilitatea evenimentului să se amplifice sau să se anuleze cu totul.[7]

În acest exemplu, înmulțim și apoi adunăm niște săgeți, cu scopul de a obține o săgeată finală (amplitudinea unui eveniment) al cărei pătrat reprezintă probabilitatea evenimentului. Trebuie subliniat faptul că, indiferent cât de multe săgeți am desena, am aduna, sau am înmulți, țelul nostru este să calculăm o *unică săgeată finală corespunzătoare evenimentului*. La început, studenții de la fizică fac adesea greșeala de a scăpa din vedere acest aspect important. Ei petrec atât de mult timp analizând evenimente ce implică câte un singur foton, încât ajung să își închipuie că săgeata este cumva asociată fotonului. Însă aceste săgeți reprezintă amplitudini de probabilitate și, ridicate la pătrat, ele dau *probabilitatea* unui eveniment complet.[8]

---

[7] Acest fenomen, numit efectul Hanbury-Brown-Twiss, a fost utilizat pentru a decela sursele de unde radio singulare de cele duble din spațiul îndepărtat, chiar și atunci când sursele duble sunt extrem de apropiate.

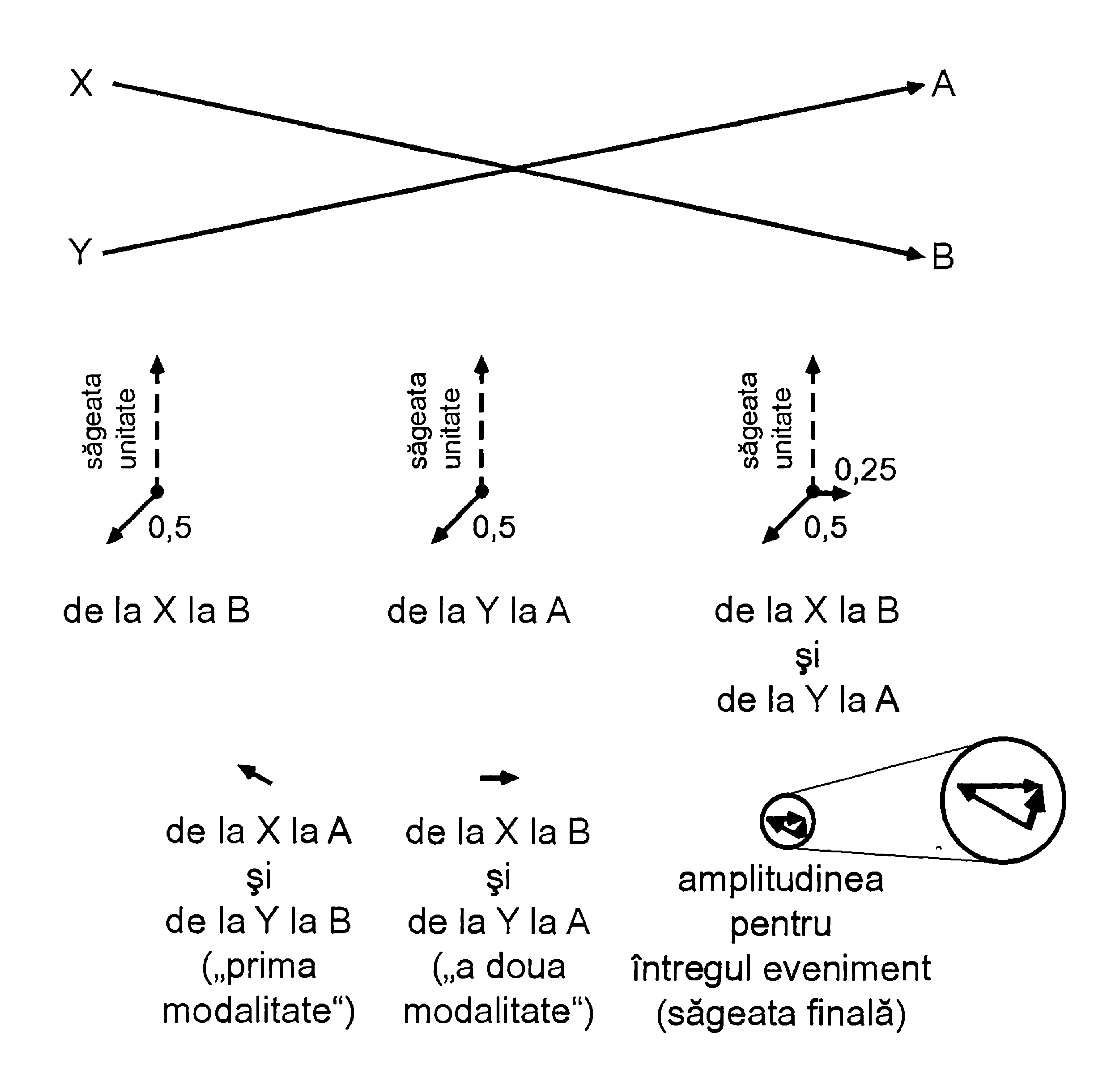


Figura 48. Celălalt fel în care s-ar putea petrece evenimentul descris în Figura 47 - fotonul din X să ajungă în B şi fotonul din Y să ajungă în A - depinde de asemenea de producerea a două lucruri independente, deci amplitudinea pentru această „a doua manieră“ se calculează tot prin înmulţirea săgeţilor corespunzătoare acelor fapte. Săgeţile obţinute pentru „prima modalitate“ şi „a doua modalitate“ se adună în cele din urmă, rezultând săgeata finală corespunzătoare evenimentului. Probabilitatea unui eveniment este totdeauna reprezentată de o *unică săgeată finală* - indiferent de cât de multe săgeţi au fost desenate, înmulţite şi adunate pe parcurs, pentru a se ajunge la aceasta.

---

[8] Nescăpând din vedere acest principiu, studenţii vor evita să fie derutaţi de lucruri precum „reducerea unui pachet de unde“ şi alte asemenea magii.

În prelegerea următoare, voi începe procesul de simplificare şi de explicare a proprietăţilor materiei - explicarea mecanismului din care provine contracţia în proporţie de 0,2, a motivului pentru care lumina pare că se propagă mai încet prin apă sau prin sticlă decât prin aer, şi aşa mai departe - căci, până aici, eu am trişat: fotonii nu ricoşează de suprafaţa sticlei, ci interacţionează cu electronii din *interiorul* acesteia. Vă voi prezenta felul în care fotonii nu fac decât să se deplaseze de la un electron la altul, şi modul în care reflexia şi transmisia reprezintă de fapt rezultatul captării unui foton de către un electron, al „scărpinării în creştetul capului", ca să zicem aşa, pe care o execută electronul, şi al emiterii de către acesta a unui nou foton. Această simplificare a tot ceea ce am discutat până acum este foarte simpatică.



ELECTRONII ŞI INTERACŢIUNILE LOR

Aceasta este a treia dintr-o serie de patru prelegeri referitoare la un subiect cât se poate de dificil - teoria electrodinamicii cuantice - şi cum în această seară, în mod vizibil, este prezentă mai multă lume decât în celelalte dăţi, înseamnă că unii dintre dumneavoastră nu aţi urmărit primele două prelegeri, şi că cea de acum vi se va părea de neînţeles. Celor care *aţi asistat* la celelalte două prelegeri, ea vi se va părea şi dumneavoastră de neînţeles, doar că dumneavoastră veţi fi ştiind că nu este nimic grav: aşa cum am explicat în prima prelegere, maniera în care suntem obligaţi să descriem Natura este în general incomprehensibilă.

Menirea acestor prelegeri este de a vă prezenta partea din fizică pe care o cunoaştem cel mai bine, şi anume interacţiunea luminii cu electronii. Majoritatea fenomenelor ce vă sunt familiare implică această interacţiune - de pildă, întreaga chimie şi biologie. Singurele fenomene care nu sunt acoperite de această teorie sunt cele gravitaţionale şi cele nucleare; toate celelalte sunt conţinute în cadrul acestei teorii.

În prima prelegere am aflat că nu dispunem de un mecanism satisfăcător care să descrie nici chiar fenomene cele mai simple, precum reflexia parţială a luminii pe sticlă. De asemenea, nu avem cum să prezicem dacă un foton anume va fi reflectat ori transmis de sticlă. Tot ceea ce putem face este să calculăm *probabilitatea* ca un anume eveniment să se întâmple - în cazul nostru, ca lumina să fie reflectată. (Atunci când lumina cade drept în jos pe o suprafaţă singulară de sticlă, această probabilitate este de aproximativ 4%; ea creşte pe măsură ce lumina cade pe suprafaţa de sticlă din ce în ce mai razant.)

În situațiile obişnuite în care avem de-a face cu probabilități, există următoarele „reguli de compunere" a lor: 1) dacă ceva se poate întâmpla în *maniere alternative*, atunci probabilitatea corespunzătoare fiecărui mod în parte *se adună*; 2) dacă evenimentul se petrece ca o *succesiune de paşi* - sau dacă depinde de un număr de lucruri ce se petrec „concomitent" (independent) - atunci probabilitățile corespunzătoare fiecărui pas (sau fiecărui lucru) în parte *se înmulțesc*.

În lumea sălbatică şi minunată a fizicii cuantice, probabilitățile se calculează ca *pătratul lungimii unei săgeți*: acolo unde, în situații obişnuite, ne-am aştepta să adunăm probabilități, vom „aduna" *săgeți*; acolo unde, în mod normal, ne-am aştepta să înmulțim probabilități, vom „înmulți" *săgeți*. Rezultatele particulare pe care le obținem calculând probabilitățile în această manieră se potrivesc perfect cu rezultatele experimentale. Eu sunt cât se poate de încântat de faptul că trebuie să recurgem la astfel de reguli ciudate şi raționamente stranii pentru a înțelege Natura, şi îmi face plăcere să le vorbesc oamenilor despre ele. În spatele acestei analizări a Naturii nu se află niciun fel de „rotițe şi angrenaje"; dacă doriți să înțelegeți Natura, trebuie să luați aceste lucruri exact aşa cum sunt.

Mai înainte de a intra propriu-zis în miezul problemei, aş dori să vă mai prezint un exemplu de mod în care se comportă lumina. Mă voi referi la lumina foarte slabă de o singură culoare - câte un foton o dată - care se propagă de la sursa din S până la detectorul D (a se vedea Figura 49). Haideți să aşezăm un paravan între sursă şi detector, şi să practicăm în el două orificii minuscule, A şi B, la câtiva milimetri distanță unul de altul. (Dacă detectorul se află la un metru depărtare de sursă, atunci orificiile trebuie să aibă mai puțin de o zecime de milimetru deschidere.) Haideți să plasăm orificiul A în linie cu S şi D, iar pe B un pic în lateral, necoliniar.

Atunci când astupăm orificiul din B, obținem în D un anumit număr de clicuri - ceea ce reprezintă fotonii care trec prin A (haideți să zicem că, în medie, detectorul clicăie o dată la 100 de fotoni plecați din S, sau 1%). Atunci când astupăm orificiul din A şi îl deschidem pe cel din B, ştim, din cea de-a doua prelegere, că obținem în medie aproape acelaşi număr de clicuri, pentru că orificiile sunt atât de mici. (Dacă „gâtuim" lumina prea mult, regulile din lumea obişnuită - cum ar fi cea că lumina se propagă în linie dreaptă - se prăbuşesc.) Atunci când deschidem ambele orificii, obținem un rezultat complicat, deoarece se manifestă interferența: dacă cele două orificii se află la o

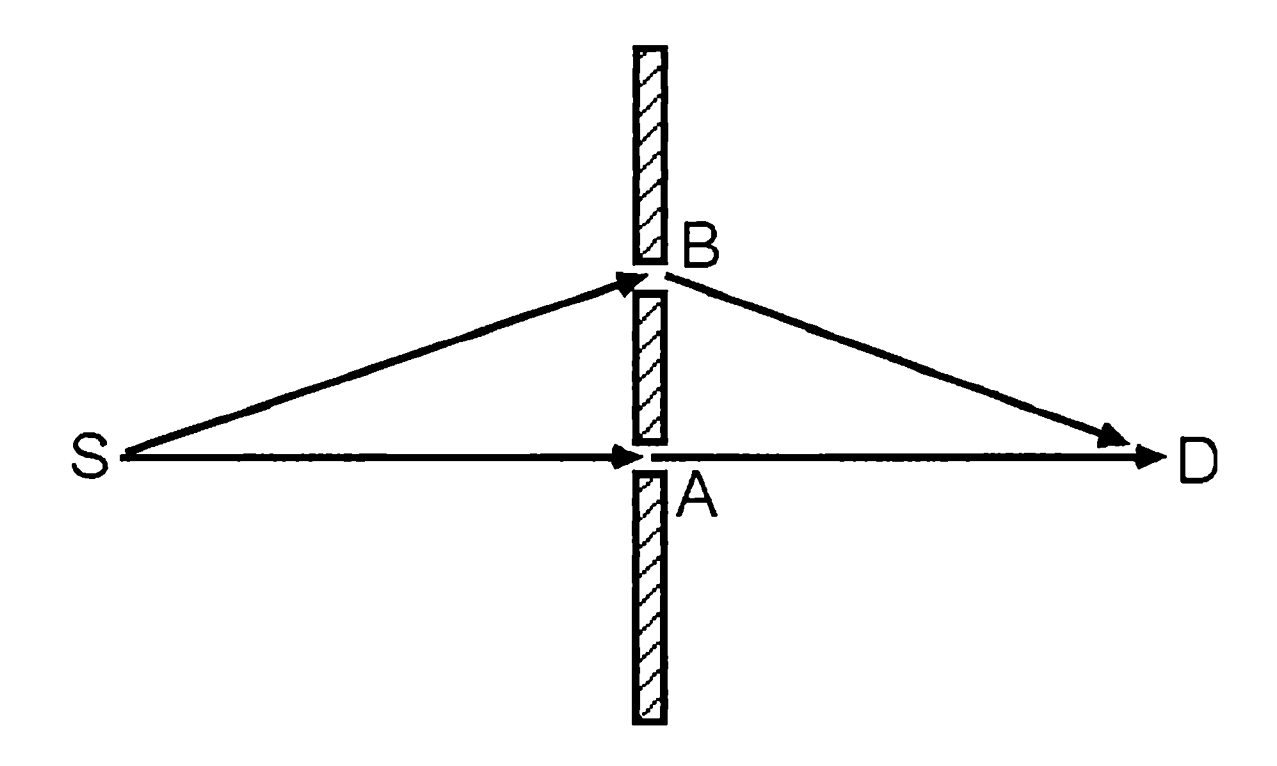


Figura 49. Două mici orificii (A şi B) practicate într-un paravan plasat între sursa S şi detectorul D, lasă să treacă aproximativ aceeaşi cantitate de lumină (în cazul nostru, 1%), atunci când oricare dintre ele este deschis. Atunci când sunt deschise ambele, se produce „interferență": detectorul clicăie între zero şi 4% din timp, în funcție de distanța dintre A şi B - aşa cum se arată în Figura 51(a).

anumită distanță unul de altul, obținem mai multe clicuri decât cele 2% care ar fi de aşteptat (maximul este de aproximativ 4%); dacă ele sunt la o distanță puțin diferită, nu obținem niciun clic.

În mod normal, s-ar putea crede că deschiderea unui al doilea orificiu conduce *totdeauna* la o creştere a cantității de lumină care ajunge la detector, însă practic nu se întâmplă aşa. Şi astfel, a afirma că lumina merge „fie pe un drum, fie pe celălalt", este eronat. Mă mai surprind şi eu rostind „ei bine, lumina merge fie pe un drum, fie pe celălalt", însă atunci când spun asta, trebuie să țin cont că mă refer la adunarea amplitudinilor: fotonul prezintă o amplitudine pentru mersul pe un drum ***şi*** o amplitudine pentru mersul pe celălalt drum. Dacă cele două se opun una alteia, lumina nu va ajunge în acel loc - chiar dacă, în acel caz, ambele orificii sunt deschise.

Acuma, comportarea stranie a Naturii merge un pic încă şi mai departe, şi aş dori să vă prezint despre ce este vorba. Să presupunem că, atunci când ambele orificii sunt deschise, aşezăm nişte detectori speciali - unul în A şi altul în B (este posibil de proiectat un detector care să ne indice dacă un foton a trecut sau nu prin el) - astfel încât să putem spune prin care orificiu (orificii) trece fotonul (a se vedea

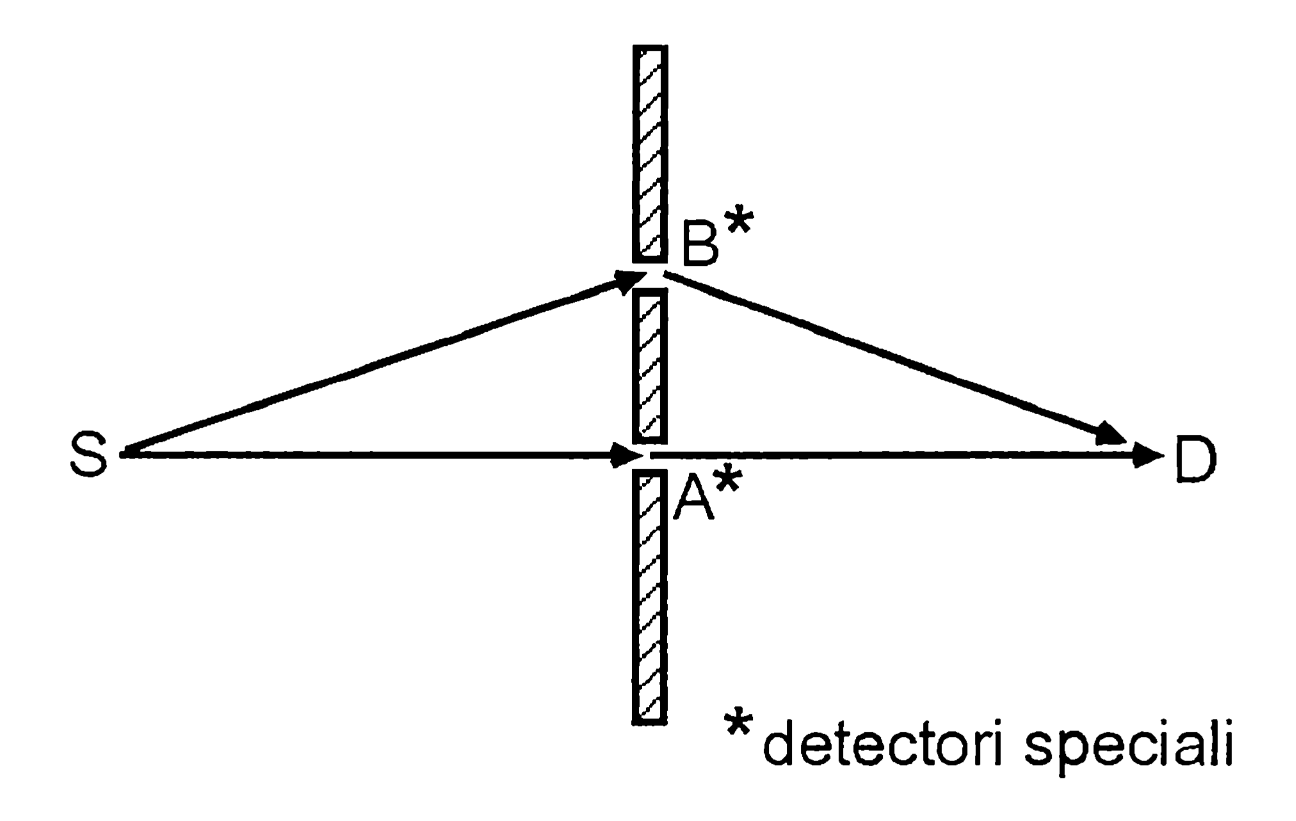


Figura 50. Atunci când în punctele A şi B sunt plasaţi nişte detectori speciali, care să ne spună pe ce drum merge lumina atunci când ambele orificii sunt deschise, experimentul este alterat. Din cauza faptului că un foton trece întotdeauna prin unul sau prin celălalt dintre orificii (atunci când le urmăriţi), există două condiţii finale distincte: 1) se declanşează detectorii din A şi D; 2) se declanşează detectorii din B şi D. Probabilitatea de producere a oricăruia din evenimente este de aproximativ 1%. Probabilităţile celor două evenimente se adună în maniera normală, conducând la o probabilitate de declanşare a detectorului din D de 2% - aşa cum se arată în Figura 51(b).

Figura 50). Din moment ce probabilitatea ca un foton singular să ajungă de la S la D nu este afectată decât de distanţa dintre orificii, ar trebui să existe vreo modalitate absconsă prin care acesta să se împartă în două, iar apoi să se strângă la loc, este? Potrivit acestei ipoteze, detectorii din A şi B ar trebui să se declanşeze totdeauna împreună (cu jumătate de intensitate, poate?), în vreme ce detectorul din D ar trebui să se declanşeze cu o probabilitate între zero şi 4%, în funcţie de distanţa între A şi B.

Iată ce se întâmplă de fapt: detectorii din A şi B nu se declanşează *niciodată* împreună - se declanşează *ori* A, *ori* B. Fotonul nu se împarte în două. El o ia fie pe un drum, fie pe celălalt.

Mai mult, în astfel de condiţii, detectorul din D se declanşează în 2% din situaţii - suma obişnuită a probabilităţilor corespunzătoare punctelor A şi B (1% + 1%). Valoarea 2% nu este afectată de distanţa dintre A şi B; atunci când în A şi B se plasează nişte detectori, interferenţa *dispare*!

Natura a pus lucrurile la cale în aşa fel încât noi să nu fim niciodată în stare să ne dăm seama cum funcţionează Ea: dacă instalăm nişte aparate de măsură cu care să aflăm drumul pe care merge lumina, putem afla acest lucru, nicio problemă, dar minunatul efect de interferenţă dispare. Dar dacă nu avem nişte instrumente care să ne spună pe ce drum o ia lumina, efectul de interferenţă revine! Într-adevăr, foarte straniu!

Pentru a înţelege acest paradox, daţi-mi voie să vă reamintesc un principiu de cea mai mare importanţă: pentru a calcula corect probabilitatea unui eveniment, trebuie avut multă grijă *să se definească în mod clar evenimentul complet* - în particular, să se precizeze clar care sunt condiţiile iniţiale şi finale ale experimentului. Să ne uităm la dispozitivul experimental înainte şi după experiment, şi să urmărim schimbările. Atunci când calculăm probabilitatea ca un foton să ajungă din S în D fără detectorii plasaţi în A şi B, evenimentul este pur şi simplu clicul făcut de detectorul din D. Atunci când singura schimbare de condiţii o reprezintă clicul din D, nu avem cum să spunem prin care din orificii a trecut fotonul, deci obţinem interferenţă.

Atunci când plasăm detectori în A şi B, schimbăm datele problemei. Acum se dovedeşte că avem *două* evenimente complete - două seturi de condiţii finale - distincte: 1) se declanşează detectorii din A şi D; 2) se declanşează detectorii din B şi D. Atunci când, în cadrul unui experiment, avem un număr de condiţii finale posibile, probabilitatea fiecăreia din ele trebuie calculată ca un eveniment separat, complet.

Pentru a calcula amplitudinea de declanşare a detectorilor din A şi D, înmulţim săgeţile corespunzătoare următorilor paşi: un foton se deplasează din S în A; un foton se deplasează din A în D; detectorul din D se declanşează. Pătratul săgeţii finale reprezintă probabilitatea acestui eveniment - 1% - aceeaşi ca în cazul în care orificiul B ar fi închis, căci în ambele cazuri avem aceiaşi paşi. Celălalt eveniment complet este acela ca detectorii din B şi D să se declanşeze. Probabilitatea acestuia se calculează în mod similar, şi este - la fel ca mai sus - egală tot cu aproximativ 1%.

Dacă vrem să aflăm cât de des se declanşează detectorul din D, fără să ţinem cont dacă pe parcursul procesului s-a declanşat detectorul din A ori cel din B, probabilitatea se determină prin simpla însumare a celor două evenimente - 2%. În principiu, dacă în sistem rămâne ceva ce *am fi putut* observa pentru a spune pe care drum a luat-o fotonul, atunci avem „stări finale“ diferite (condiţii finale distincte), şi

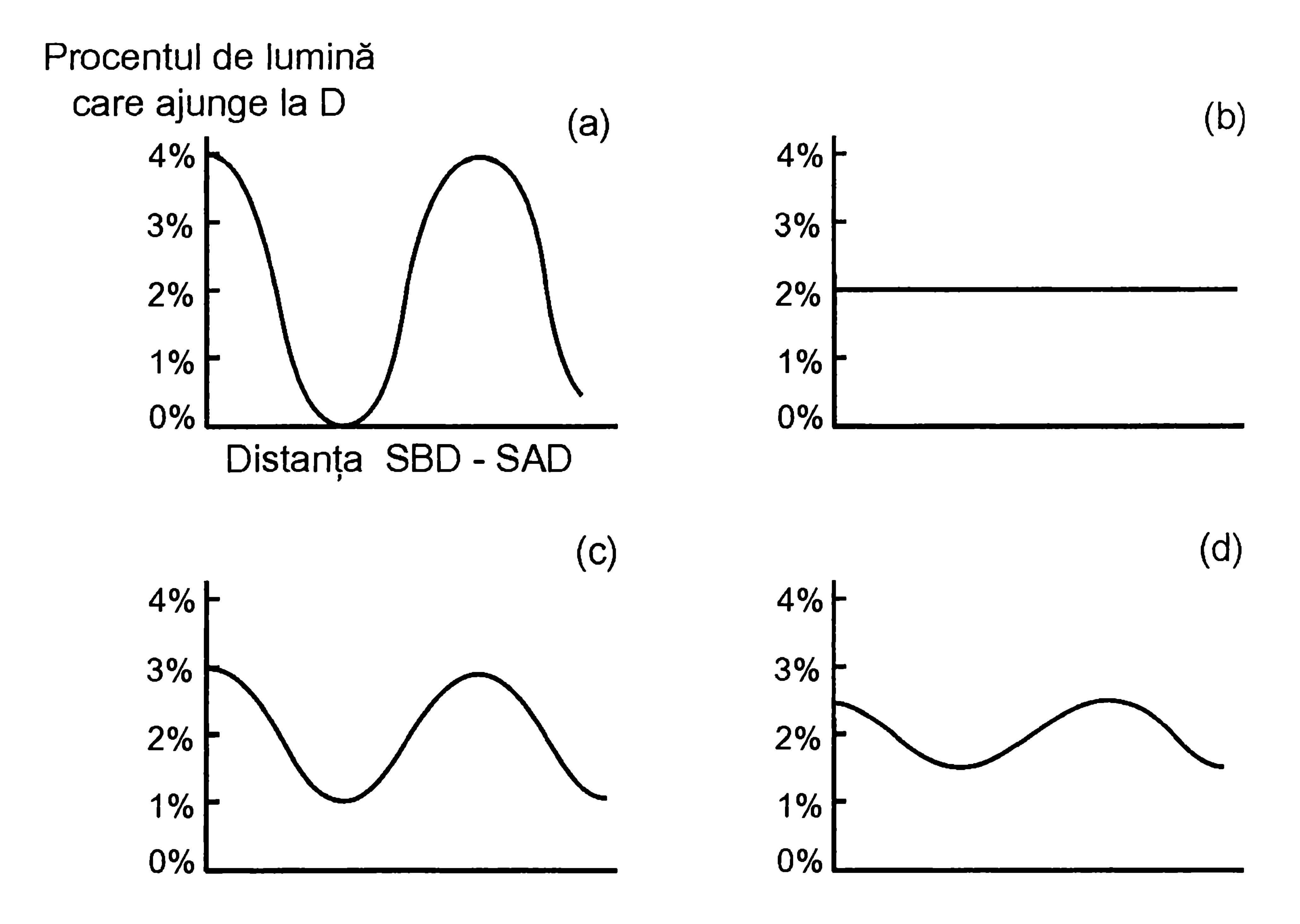


Figura 51. Atunci când în A și B nu există detectori, apare fenomenul de interferență - cantitatea de lumină variază între zero și 4% (a). Atunci când în A și B se află niște detectori cu fiabilitate 100%, nu apare interferență - cantitatea de lumină ce ajunge în D este în mod constant 2% (b). Atunci când detectorii din A și B nu au fiabilitate de funcționare de 100% (adică, atunci când *uneori* în A sau în B nu rămâne nicio urmă a trecerii unui foton care să poată fi detectată), există trei condiții finale posibile - fie să se declanșeze A și D, fie să se declanșeze B și D, fie să se declanșeze numai D. În acest caz, curba finală reprezintă o mixtură, alcătuită din contribuțiile fiecărei condiții finale posibile. Atunci când detectorii din A și B sunt mai puțin de încredere, este prezentă mai multă interferență. Astfel, detectorii din varianta (c) sunt mai puțin fiabili decât cei din varianta (d). Principiul referitor la interferență este următorul: probabilitatea corespunzătoare fiecărei condiții finale posibile trebuie calculată separat, adunând săgeți și ridicând la pătrat lungimea săgeții finale; apoi, acele câteva probabilități se adună în manieră obișnuită.

pentru fiecare stare finală trebuie să adunăm *probabilitățile*... nu amplitudinile.[1]

Am subliniat aceste lucruri deoarece, cu cât observați mai mult cât de straniu se comportă Natura, cu atât este mai greu să imaginați un model care să explice maniera în care funcționează până și cele mai simple fenomene. Așa încât fizica teoretică s-a dat bătută în această privință.

Am văzut în prima prelegere modalitatea în care un eveniment poate fi împărțit în mai multe maniere alternative și felul în care pot fi „adunate" săgețile corespunzătoare fiecărui mod în parte. În a doua prelegere, am văzut felul în care fiecare modalitate poate fi împărțită în mai mulți pași succesivi, faptul că săgeata corespunzătoare fiecărui pas poate fi privită ca transformarea unei săgeți unitate, și felul în care săgețile respective pot fi „înmulțite" prin intermediul unor contracții și rotiri succesive. Așadar, ne sunt familiare toate regulile necesare pentru desenarea și compunerea săgeților reprezentând frânturi de eveniment, pentru a obține săgeata finală al cărei pătrat reprezintă probabilitatea unui eveniment observat în natură.

Este firesc să ne punem întrebarea cât de departe putem merge cu acest proces de descompunere a evenimentelor în subevenimente din ce în ce mai simple. Care sunt cele mai mici crâmpeie posibile de eveniment? Există oare un număr finit de fragmente care să poată fi compuse spre a forma *toate* fenomenele ce implică lumină și electroni? Există oare un număr finit de „litere" în cadrul acestui limbaj al electrodinamicii cuantice, care să poată fi combinate pentru a forma „cuvinte" și „fraze" în stare să descrie aproape orice fenomen din natură?

---

[1] Povestea completă în legătură cu această situație este foarte interesantă: dacă detectorii din A și B nu sunt perfecți și detectează fotonii doar în *unele* dăți, atunci există *trei* condiții finale distincte: 1) se declanșează detectorii din A și D; 2) se declanșează detectorii din B și D; 3) se declanșează numai detectorul din D, cei din A și B rămânând nemodificați (rămânând în starea lor inițială). Probabilitatea pentru primele două evenimente se calculează în maniera explicată mai sus (cu singura deosebire că pentru probabilitatea ca detectorul din A - sau din B - să se declanșeze, va exista o contracție, întrucât ei nu sunt ideali). Atunci când se declanșează numai detectorul din D, cele două variante nu pot fi separate, și natura se joacă cu noi introducând interferență - același rezultat ciudat pe care l-am fi obținut și dacă nu ar fi existat detectori deloc (doar că acum săgeata finală se contractă corespunzător amplitudinii ca detectorii să *nu* se declanșeze). Rezultatul final este un melanj, simpla însumare a tuturor celor trei cazuri (a se vedea Figura 51). Cu cât siguranța în funcționare a celor doi detectori crește, cu atât obținem mai puțină interferență.

Răspunsul este afirmativ; acest număr este numărul trei. Există doar trei acțiuni de bază necesare pentru a produce toate fenomenele asociate cu lumina şi cu electronii. Mai înainte de a vă spune care sunt aceste trei acțiuni de bază, ar trebui să vă prezint aşa cum se cuvine actorii. Actorii sunt fotonii şi electronii. Fotonii, particulele de lumină, au fost discutați pe larg în primele două prelegeri. Electronii au fost puşi în evidență ca particule în 1895: ei pot fi numărați - poate fi dispus un electron pe o picătură fină de ulei, căreia să i se determine sarcina electrică. Treptat, a devenit evident că mişcarea acestor particule este răspunzătoare de curentul electric din firele de sârmă.

La scurt timp după descoperirea electronilor, s-a avansat ideea că atomii ar fi ca nişte minuscule sisteme solare, alcătuite dintr-o parte centrală grea (numită nucleu) şi din electroni, care se rotesc pe „orbite“ cam la fel cum planetele se învârtesc în jurul Soarelui. Dacă vă închipuiți cumva că atomii chiar arată aşa, înseamnă că încă mai trăiți în anul 1910. În 1924, Louis de Broglie a descoperit faptul că există o caracteristică ondulatorie asociată electronilor, iar curând după aceea, C. J. Davisson şi L. H. Germer, de la Bell Laboratories, au bombardat cu electroni un cristal de nichel şi au arătat că electronii ricoşează şi ei sub unghiuri aiuritoare (asemenea razelor X) şi că aceste unghiuri pot fi calculate din formula lui de Broglie referitoare la lungimea de undă asociată unui electron.

Atunci când privim fotonii la scară mare - mult mai mare decât distanța corespunzătoare unei rotiri a acului cronometrului - fenomenele pe care le observăm sunt aproximate foarte bine de reguli precum „lumina se propagă în linie dreaptă“, deoarece există suficiente drumuri în jurul drumului de timp minim pentru ca ele să poată conlucra între ele, şi suficiente alte drumuri care să se contracareze între ele. Însă atunci când spațiul prin care trece un foton devine prea mic (aşa ca minusculele orificii din paravan), aceste reguli eşuează - descoperim că lumina nu trebuie să se propage în linie dreaptă, cele două orificii produc interferență, şi aşa mai departe. Cu electronii se întâmplă exact la fel: priviți la scară mare, ei se deplasează precum particulele, pe traiectorii bine definite. Dar la scară mică, aşa cum ar fi în interiorul unui atom, spațiul este atât de restrâns încât nu există un drum principal, nu există „orbită“; există tot felul de moduri în care s-ar putea deplasa un electron, fiecare cu amplitudinea sa. Fenomenul de interferență devine foarte important şi, pentru a putea prezice locul unde este de aşteptat să se găsească un electron, trebuie să adunăm săgețile corespunzătoare.

Este cât se poate de interesant să notăm că la început electronii au părut a fi particule, și că abia apoi a fost descoperit caracterul lor ondulatoriu. Pe de altă parte, cu excepția faptului că Newton a făcut o greșeală și a crezut că lumina este „corpusculară“, lumina a părut la început a fi o undă, și abia după aceea a fost descoperit caracterul ei corpuscular. În fapt, ambele obiecte se comportă întrucâtva ca unde și întrucâtva ca particule. Pentru a ne scuti de efortul de a inventa noi cuvinte precum „ondusculi“, am decis să numim aceste obiecte „particule“, dar știm cu toții că ele se supun acestor reguli referitoare la desenarea și compunerea săgeților, pe care vi le-am descris. Se pare că toate „particulele“ din natură - quarkuri, gluoni, neutrini și așa mai departe (ele vor fi discutate în prelegerea următoare) - se comportă în această manieră a mecanicii cuantice.

Așa încât vă voi face acum cunoștință cu cele trei acțiuni de bază, din care decurg toate fenomenele legate de lumină și de electroni.

- ACȚIUNEA nr. 1: Un foton se deplasează dintr-un loc în altul;
- ACȚIUNEA nr. 2: Un electron se deplasează dintr-un loc în altul;
- ACȚIUNEA nr. 3: Un electron emite sau absoarbe un foton.

Fiecare din aceste acțiuni prezintă o amplitudine - o săgeată - care poate fi calculată potrivit unor reguli anume. Imediat vă voi spune aceste reguli, sau legi, din care putem concepe întreaga lume (cu excepția nucleelor și gravitației, ca întotdeauna!).

Acuma, scena pe care se desfășoară aceste acțiuni nu este numai spațiul, ci spațiul și timpul. Până aici nu am luat în discuție chestiunile legate de timp, cum ar fi problema momentului exact în care un foton părăsește sursa și a momentului exact în care el ajunge la detector. Deși spațiul real este tridimensional, pe desenele pe care le voi face, eu îl voi reduce la o singură dimensiune: voi reprezenta pe axa orizontală poziția anumită a obiectului în spațiu, iar pe axa verticală momentul de timp corespunzător.

Primul eveniment pe care îl voi desena în spațiu și timp - sau spațiutimp, cum s-ar putea să-l mai numesc la repezeală - îl reprezintă o minge de baseball aflată în repaus (a se vedea Figura 52). Joi dimineața, moment pe care îl voi nota T_0, mingea ocupă un anumit loc în spațiu, pe care îl voi nota X_0. După câteva clipe, la momentul T_1, ea ocupă același loc, fiind în repaus. Încă și mai târziu, la T_2, mingea se află în continuare în X_0. Deci graficul unei mingi de baseball în repaus este o bandă verticală, ce se derulează în sus și conține mingea peste tot.

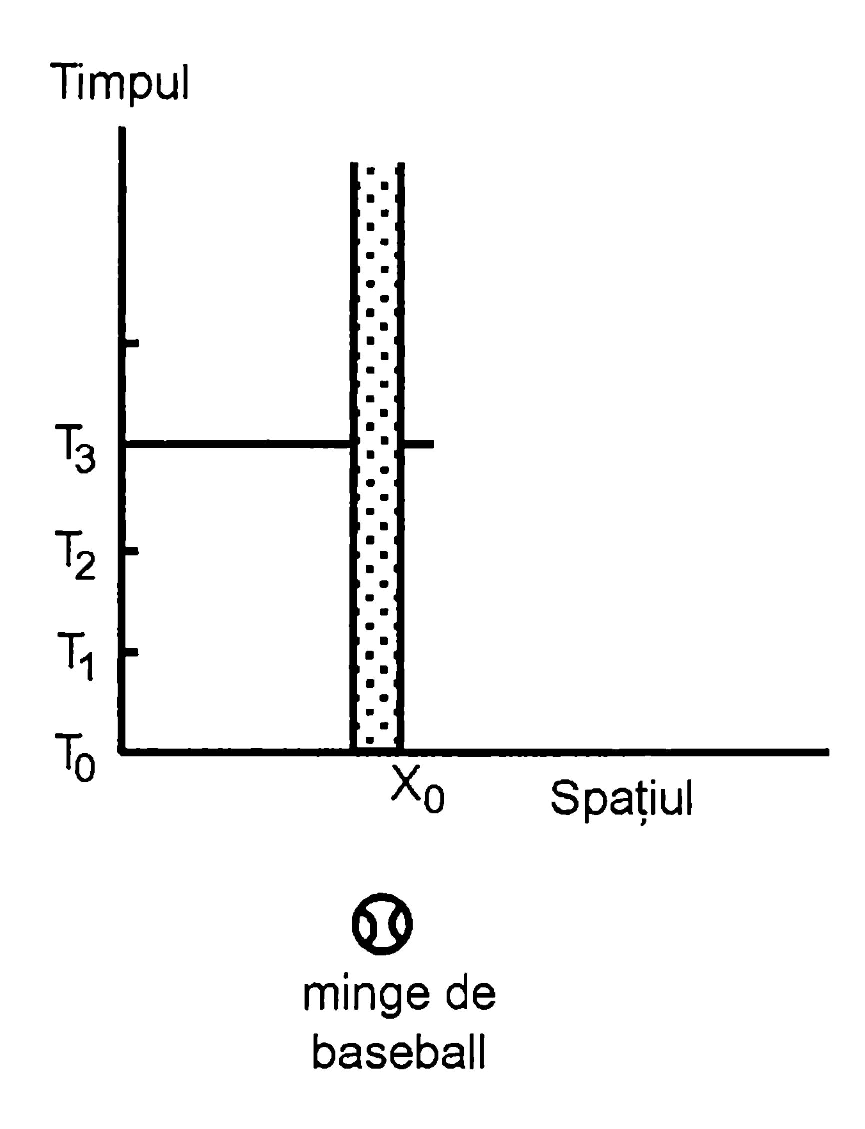


Figura 52. Scena pe care au loc toate acțiunile din Univers este spațiutimpul. Deşi constând în general din patru dimensiuni (trei spațiale şi una temporală), spațiutimpul va fi reprezentat în cazul de față în două dimensiuni - una pentru spațiu, de-a lungul axei orizontale, şi una pentru timp, de-a lungul celei verticale. De fiecare dată când privim mingea de baseball (cum ar fi, de exemplu, la momentul T_3), ea se află în exact acelaşi loc. Acest lucru dă naştere unei „benzi de baseball" care urcă vertical, odată cu trecerea timpului.

Ce se întâmplă dacă avem o minge de baseball plutind în spațiul cosmic în imponderabilitate, şi îndreptându-se către un perete? Ei bine, joi dimineața (T_0) ea porneşte din X_0 (a se vedea Figura 53), dar un pic mai târziu nu se mai află în acelaşi loc - s-a deplasat puțin, până în X_1. Pe măsură ce mingea continuă să plutească, ea dă naştere pe diagrama spațiu-timp unei „benzi de baseball" oblice. În momentul în care mingea loveşte peretele (care se află în repaus şi, ca atare, este reprezentat de o bandă verticală), ea se întoarce exact de unde a plecat (X_0), dar la un alt moment de timp (T_6).

În ceea ce priveşte axa timpului, este mult mai convenabil să reprezentăm diviziunile nu în secunde, ci în unități mult mai mici. Din moment ce avem de-a face cu fotoni şi cu electroni, care se deplasează foarte repede, voi considera că un unghi de 45° reprezintă ceva care se mişcă cu viteza luminii. De exemplu, pentru o particulă care se

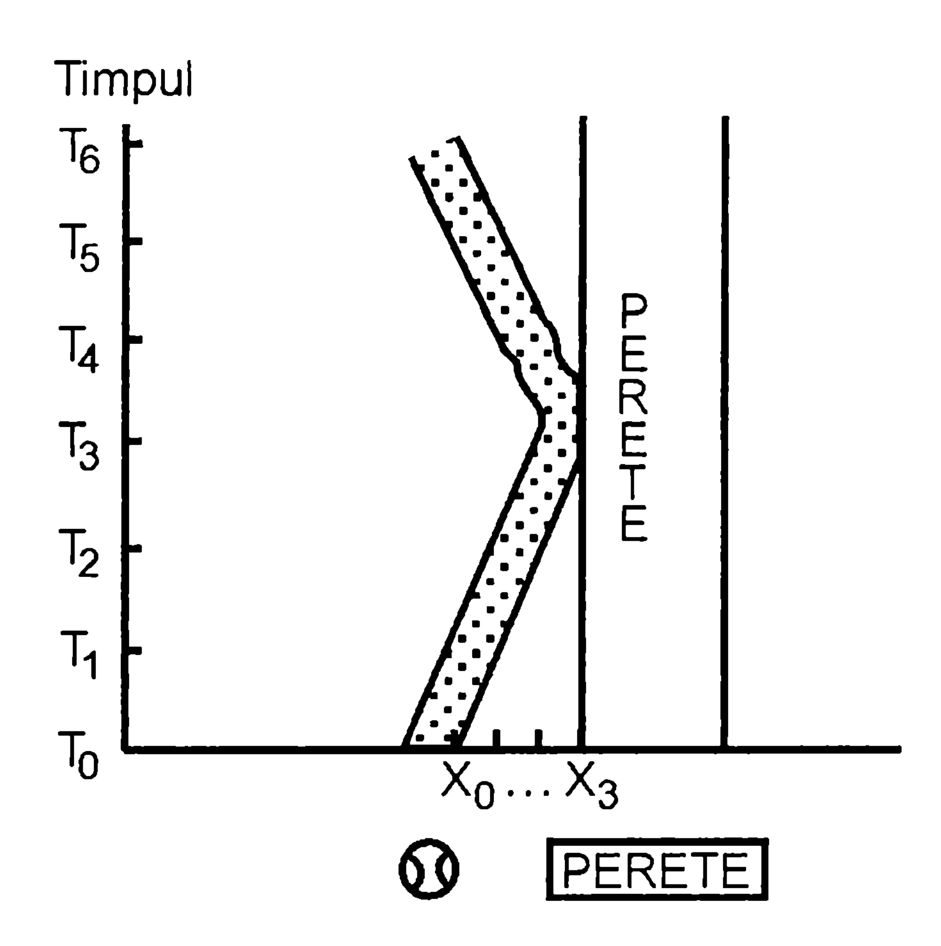


Figura 53. O minge de baseball care pluteşte în linie dreaptă către un perete, îl ciocneşte frontal şi ricoşează înapoi până în punctul de plecare (reprezentat sub grafic), se deplasează într-o singură dimensiune, şi apare pe desen ca o „bandă de baseball" înclinată. La momentele de timp T_1 şi T_2 mingea se apropie de perete; la momentul T_3 ea loveşte peretele şi o ia înapoi.

deplasează cu viteza luminii de la X_1T_1 la X_2T_2, distanţa pe orizontală între X_1 şi X_2 este egală cu distanţa pe verticală între T_1 şi T_2 (a se vedea Figura 54). Factorul cu care este multiplicat timpul (pentru ca un unghi de 45° să reprezinte o particulă ce se deplasează cu viteza luminii) se notează cu *c*, şi îl veţi regăsi peste tot în cadrul formulelor lui Einstein - acest fapt este rezultatul alegerii nefericite a secundei ca unitate de măsură a timpului, în locul alegerii intervalului necesar luminii pentru a străbate o distanţă de un metru.

Haideţi să privim în detaliu prima acţiune de bază - un foton se deplasează dintr-un loc în altul. Fără vreun motiv anume, vom desena această acţiune sub forma unei linii ondulate între A şi B. Ar trebui să fiu mai atent în exprimare: ar trebui să spun că un foton despre care se ştie că se află într-un anumit loc la un anumit moment de timp, are o anumită amplitudine de ajungere într-un alt loc la un alt moment de timp. Pe graficul meu spaţiu-timp (a se vedea Figura 55), fotonul din punctul A - de la X_1 şi T_1 - are o anumită amplitudine de apariţie în punctul B - la X_2 şi T_2. Voi nota valoarea acesteia cu F(de la A la B).

Există o formulă pentru mărimea acestei săgeţi, F(de la A la B). Este vorba despre una din marile legi ale Naturii, şi este foarte simplă.

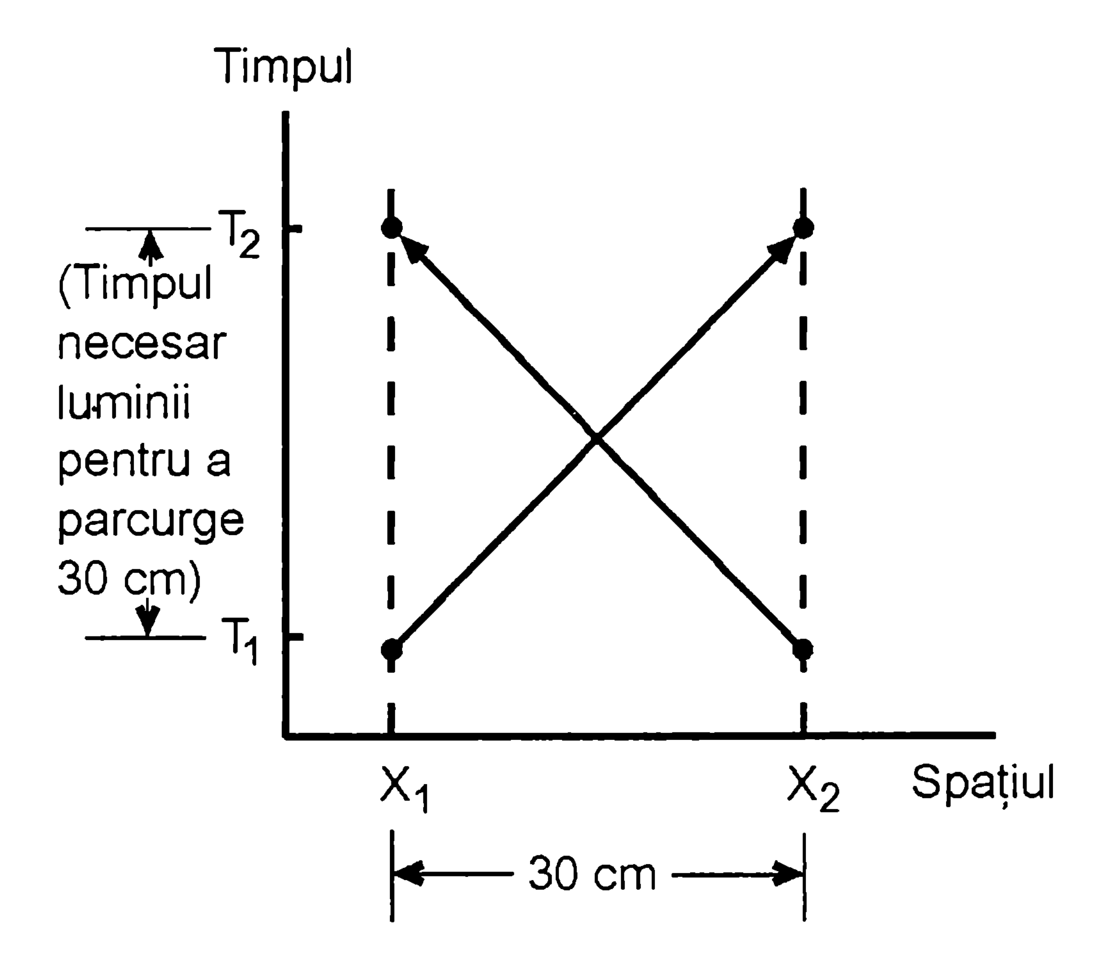


Figura 54. Scara timpului pe care o voi folosi în aceste grafice va arăta particulele care se deplasează cu viteza luminii ca mişcându-se sub un unghi de 45° în spațiutimp. Durata necesară luminii pentru a parcurge 30 de centimetri - de la X_1 la X_2 sau de la X_2 la X_1 - este de aproximativ o miliardime de secundă.

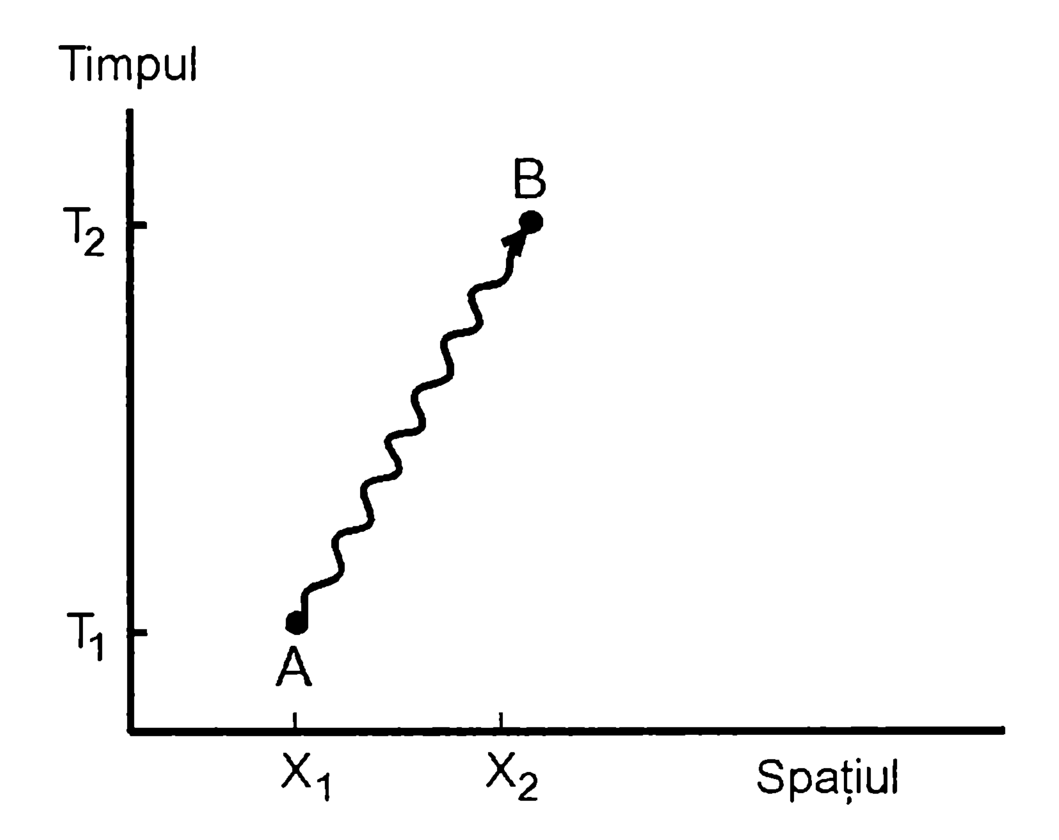


Figura 55. Un foton (reprezentat aici ca o linie ondulată) are o anumită amplitudine de ajungere dintr-un punct A din spațiutimp, într-un alt punct B. Această amplitudine, pe care o voi nota cu F(de la A la B), se calculează cu o formulă care depinde numai de diferența de poziție - $(X_2 - X_1)$ - şi de diferența de timp - $(T_2 - T_1)$. În fapt, este vorba de o funcție simplă, care reprezintă inversul diferenței pătratelor lor. Această ultimă diferență este denumită „interval" *I*, şi poate fi scrisă sub forma $(X_2 - X_1)^2 - (T_2 - T_1)^2$.

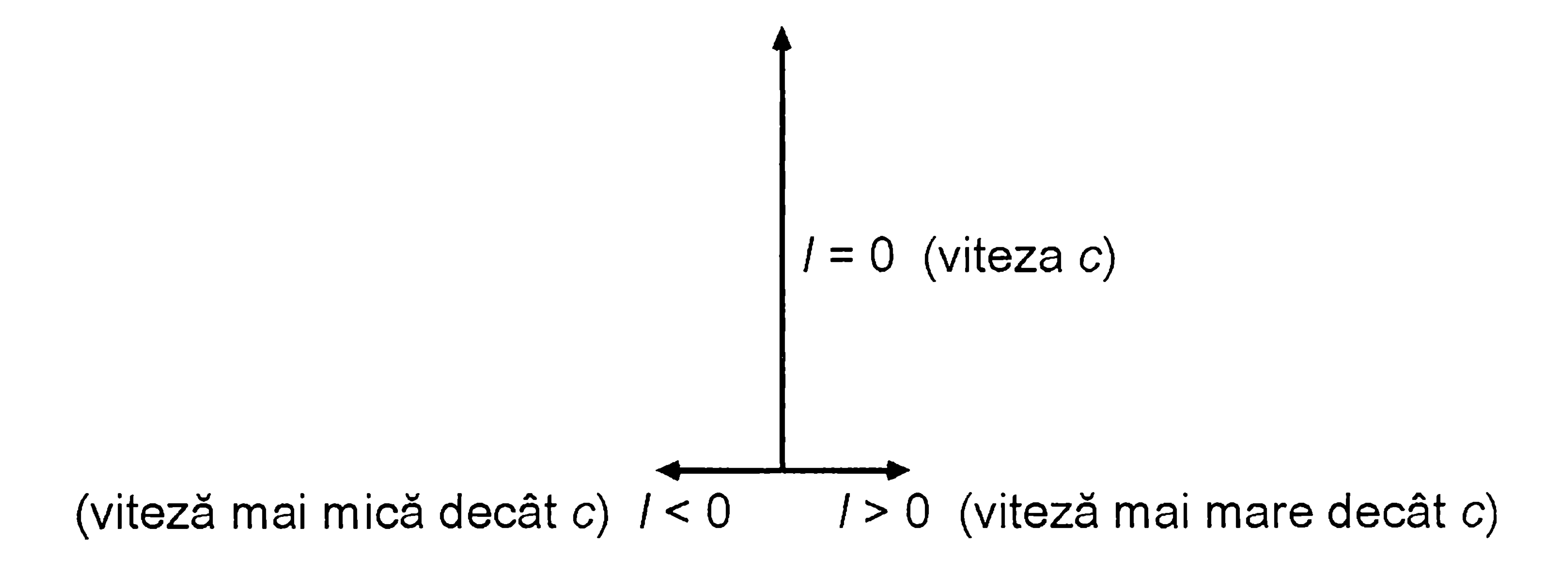


Figura 56. Atunci când lumina se propagă cu viteza convențională, *c*, „intervalul“, *I*, este egal cu zero, și avem o contribuție mare, orientată la ora 12. Atunci când *I* este mai mare ca zero, există o contribuție mică, orientată la ora 3, invers proporțională cu *I*; atunci când *I* este mai mic ca zero, există o contribuție similară, înspre ora 9. Așadar, lumina prezintă câte o amplitudine de propagare cu viteză mai mare și respectiv mai mică decât *c*, dar, pe distanțe lungi, acestea două se anulează reciproc.

Ea depinde de diferența *de distanță* și de diferența *de timp* dintre cele două puncte. Aceste diferențe pot fi exprimate matematic[2] sub forma $(X_2 - X_1)$ și $(T_2 - T_1)$.

---

[2] Pe parcursul acestor prelegeri, eu trasez poziția unui punct în spațiu într-o singură dimensiune, de-a lungul axei X. Pentru a localiza poziția unui punct într-un spațiu cu trei dimensiuni, trebuie gândit un „colț de cameră“ și trebuie măsurate distanțele de la punct la podea și la cei doi pereți care se îmbină acolo (toate perpendiculare unele pe altele). Cele trei valori pot fi notate X_1, Y_1 și Z_1. Distanța propriu-zisă de la acel punct la altul, caracterizat de X_2, Y_2, Z_2, se poate calcula cu o „teoremă a lui Pitagora în trei dimensiuni“: pătratul acestei distanțe este $(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2$. Rezultatul obținut în urma scăderii dintre *acest pătrat al distanței* și pătratul diferenței de timp - $(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2 - (T_2 - T_1)^2$ - se mai numește uneori „Interval“, sau *I*, și reprezintă expresia de care depinde F(de la A la B) potrivit Teoriei Relativității a lui Einstein. Cea mai mare parte a contribuției la săgeata finală corespunzătoare lui F(de la A la B) provine exact de acolo de unde ne așteptam - de la situația în care distanța este egală cu diferența de timp (adică, de la cazul în care *I* este egal cu zero). Însă, în plus, există și o contribuție din partea cazului în care *I* nu este egal cu zero, invers proporțională cu *I*: ea este îndreptată către ora 3 atunci când *I* este pozitiv (atunci când lumina se deplasează cu viteză mai mare decât *c*), și este îndreptată către ora 9 atunci când *I* este negativ. În multe din situații, aceste ultime contribuții se anulează reciproc (a se vedea Figura 56).

Contribuția majoră la F(de la A la B) vine din partea vitezei convenționale a luminii - atunci când (X_2 -X_1) este egal cu (T_2 - T_1) - de unde ne-am aştepta să vină întreaga contribuție. Însă există de asemenea şi o amplitudine ca lumina să se propage cu o viteză mai mare (sau mai mică) decât cea convențională. În prelegerea anterioară ați aflat că lumina nu se propagă numai în linie dreaptă; acum descoperiți că ea nu se propagă nici doar cu viteza luminii!

S-ar putea să vă surprindă faptul că există o amplitudine ca un foton să se deplaseze cu viteze mai mari decât cea convențională, *c*. Amplitudinile acestor posibilități sunt foarte mici în comparație cu contribuția din partea vitezei *c*; în fapt, atunci când lumina se propagă pe distanțe lungi, ele se anulează reciproc. Totuşi, pe distanțe mici - aşa cum va fi cazul în multe din diagramele pe care le voi desena - aceste alte posibilități devin de o importanță vitală, şi trebuie luate în calcul.

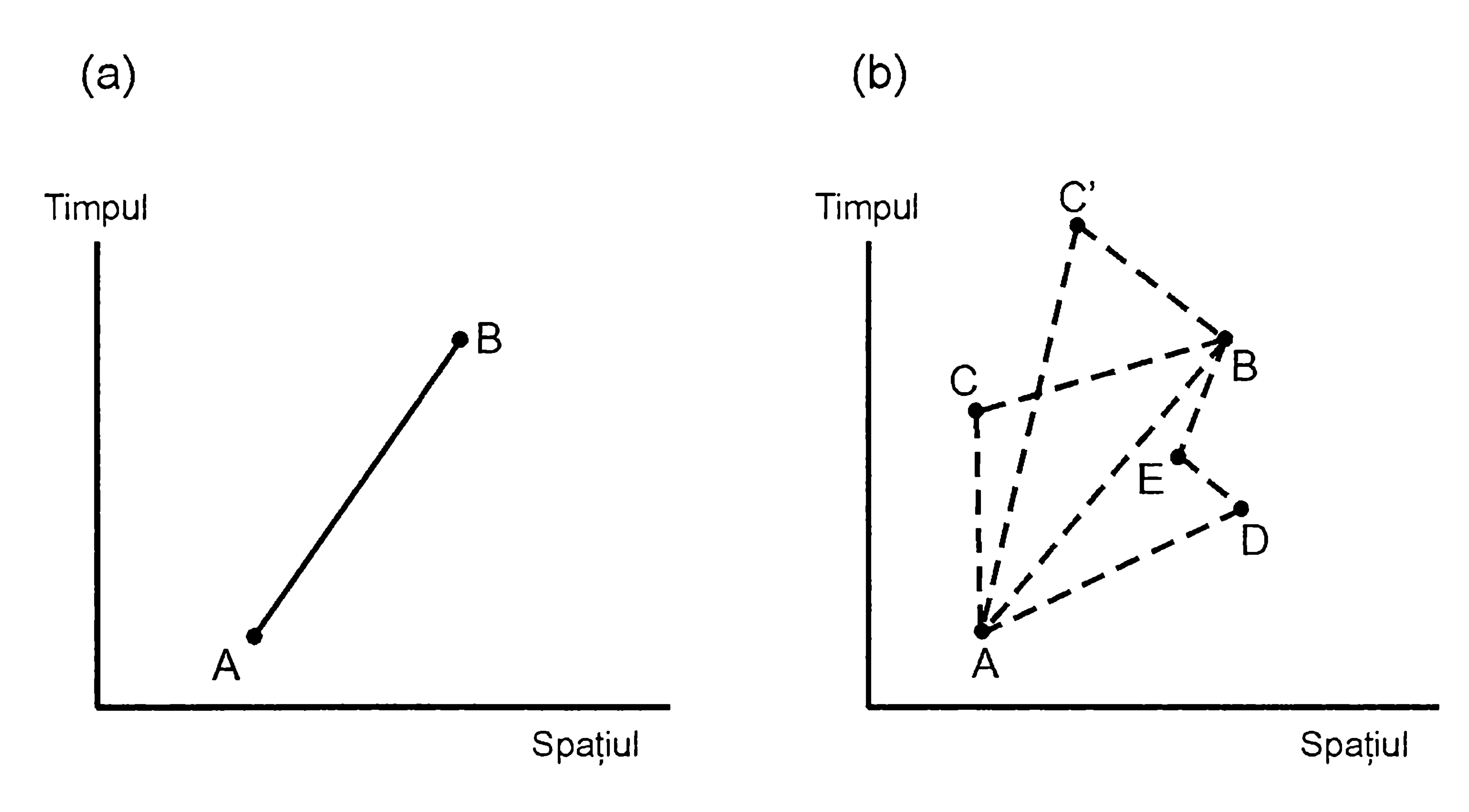


Figura 57. Un electron prezintă o anumită amplitudine de a se deplasa dintr-un punct în altul în spațiutimp, pe care o voi nota „E(de la A la B)". Deşi E(de la A la B) va fi reprezentată ca o linie dreaptă ce uneşte cele două puncte (a), expresia poate fi gândită ca o sumă de multe amplitudini - printre acestea, amplitudinea electronului de a-şi schimba direcția în punctele C ori C', într-un „zbor cu o escală", sau amplitudinea electronului de a-şi schimba direcția în punctele D şi E, într-un „zbor cu două escale" - care se adaugă drumului direct de la A la B (b). Numărul de câte ori îşi poate schimba electronul direcția, poate avea orice valoare între zero şi infinit, iar punctele în care electronul îşi poate schimba direcția, în drumul său de la A la B prin spațiutimp, sunt infinit de multe. Toate acestea sunt incluse în E(de la A la B).

Deci, aceasta este prima acțiune de bază, prima lege de bază a fizicii - un foton se deplasează dintr-un loc în altul. Ea explică tot ceea ce este legat de optică: în aceasta constă întreaga teorie a luminii! Mă rog, nu chiar: am omis fenomenul de polarizare (ca de obicei) și interacțiunea luminii cu materia, ceea ce mă conduce la cea de-a doua lege.

A doua acțiune fundamentală a electrodinamicii cuantice este: un electron se deplasează dintr-un punct A într-un punct B în spațiu-timp. (Pentru moment, ne vom imagina acest electron ca pe unul simplificat, artificial, care nu prezintă polarizare - ceea ce fizicienii numesc „electron cu spin zero". În realitate, electronii au un tip de polarizare, ce nu aduce nimic în plus ideii de bază, ci doar complică un pic formulele.) Expresia amplitudinii corespunzătoare acestei acțiuni, pe care o voi nota cu E(de la A la B), depinde și ea de (X_2 -X_1) și de (T_2 - T_1) (în aceeași manieră descrisă în nota de subsol 2), și mai depinde și de un număr, pe care îl voi nota cu „*n*", a cărui valoare odată determinată, permite tuturor calculelor noastre să concorde cu experimentul. (Vom vedea ceva mai târziu modul în care se determină valoarea lui *n*.) Formula este cât se poate de complicată, și îmi cer scuze pentru faptul că nu știu cum să o explic în termeni simpli. Totuși, s-ar putea să fiți interesați să aflați că, dacă se ia *n* egal cu zero, formula pentru F(de la A la B) - deplasarea unui foton dintr-un loc în altul în spațiutimp - este aceeași cu formula pentru E(de la A la B), deplasarea unui electron dintr-un loc în altul.[3]

---

[3] Formula pentru E(de la A la B) este complicată, dar există o manieră interesantă de a explica la ce revine ea. E(de la A la B) poate fi reprezentată sub forma unei sume nesfârșite de sumedenii de moduri diferite în care un electron ar putea ajunge din punctul A în punctul B în spațiutimp (a se vedea Figura 57): electronul ar putea efectua un „zbor fără escală", direct de la A la B; ar putea efectua un „zbor cu o escală", oprindu-se într-un punct intermediar C; ar putea efectua un „zbor cu două escale", oprindu-se în punctele D și E; și așa mai departe. În cadrul unei asemenea analize, amplitudinea corespunzătoare fiecărui „salt" - dintr-un punct G într-un punct H - este F(de la G la H), aceeași cu cea a deplasării unui foton din G în H. Amplitudinea fiecărei „escale" este reprezentată de n^2, *n* fiind același număr despre care am afirmat mai devreme că servește la asigurarea corectitudinii calculelor noastre.

În consecință, expresia E(de la A la B) constă într-o serie de termeni: F(de la A la B) [„zborul fără escală"] + F(de la A la C) × n^2 × F(de la C la B) [„zborurile cu o escală", cu oprire în punctele C] + F(de la A la D) × n^2 × F(de la D la E) × n^2 × F(de la E la B) [„zborurile cu două escale", cu opriri în D și E] + ..., sumă calculată pentru *toate punctele intermediare posibile* C, D, E și așa mai departe.

Este de remarcat faptul că, atunci când *n* crește, contribuția drumurilor indirecte la săgeata finală devine mai mare. Atunci când *n* este zero (așa ca în cazul fotonului), toți termenii care conțin factor pe *n* dispar (se anulează), lăsând doar primul termen, F(de la A la B). Așadar, E(de la A la B) și F(de la A la B) sunt strâns legate între ele.

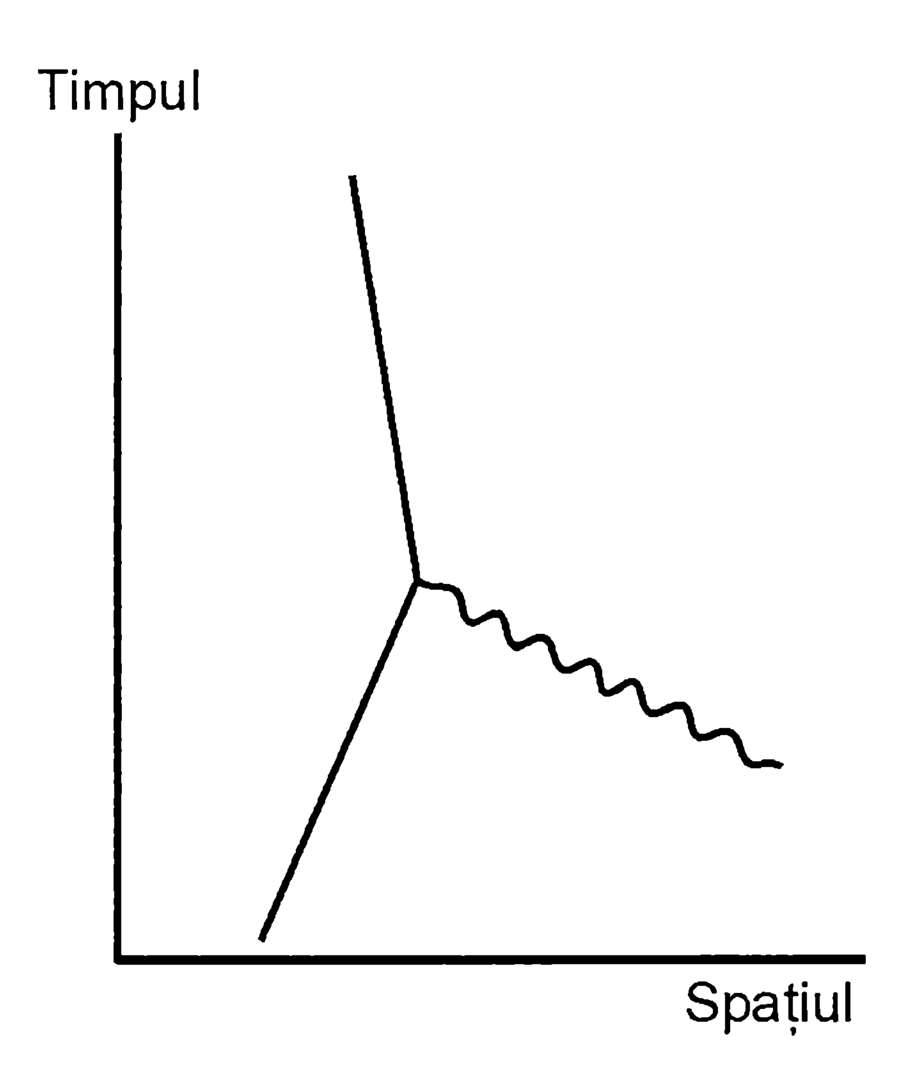


Figura 58. Un electron, reprezentat printr-o linie dreaptă, are o anumită amplitudine de a emite sau de a absorbi un foton, acesta din urmă fiind reprezentat printr-o linie ondulată. Cum amplitudinea de emitere sau absorbție este aceeași, voi numi ambele situații „cuplare". Amplitudinea corespunzătoare cuplării este un număr pe care îl voi nota *j*; pentru electron, el are aproximativ valoarea -0,1 (uneori, acest număr este numit „sarcină").

A treia acțiune de bază este: un electron emite sau absoarbe un foton - nu contează care anume din aceste două lucruri. Voi numi această acțiune „joncțiune" sau „cuplare". Pentru a deosebi electronii de fotoni, fiecare electron ce se deplasează în spațiutimp va fi reprezentat pe diagrame ca o linie dreaptă. Prin urmare, fiecare cuplare va fi joncțiunea dintre două linii drepte și una ondulată (a se vedea Figura 58). Nu există vreo formulă complicată pentru amplitudinea emiterii sau absorbției unui foton de către un electron; ea nu depinde de nimic - este pur și simplu un număr! Voi nota acest număr caracteristic joncțiunii cu *j*; valoarea lui este aproximativ -0,1: o contracție în proporție de circa unu la zece, însoțită de o rotație cu o jumătate de tură.[4]

[4] Acest număr, amplitudinea de emitere sau absorbție a unui foton, se mai numește uneori și „sarcina" particulei respective.

Ei bine, asta-i tot despre aceste acțiuni de bază... cu excepția unei ușoare complicații datorate acestei polarizări pe care am tot scos-o din discuție. Treaba noastră în continuare este să punem laolaltă aceste trei acțiuni, pentru a descrie situații oarecum mai complexe.

Ca un prim exemplu, haideți să calculăm probabilitatea ca doi electroni, aflați în punctele 1 și 2 în spațiutimp, să ajungă în punctele 3 și 4 (a se vedea Figura 59). Acest eveniment se poate întâmpla în două moduri. Primul mod ar fi ca electronul din 1 să ajungă în 3 - se calculează înlocuind 1 și 3 în formula E(de la A la B), adică E(de la 1 la 3) - iar cel din 2 să ajungă în 4 - se calculează sub forma E(de la 2 la 4). Acestea sunt două „subevenimente" ce se petrec concomitent, deci cele două săgeți se înmulțesc pentru a da naștere unei săgeți corespunzătoare acestei prime modalități de producere a evenimentului studiat.

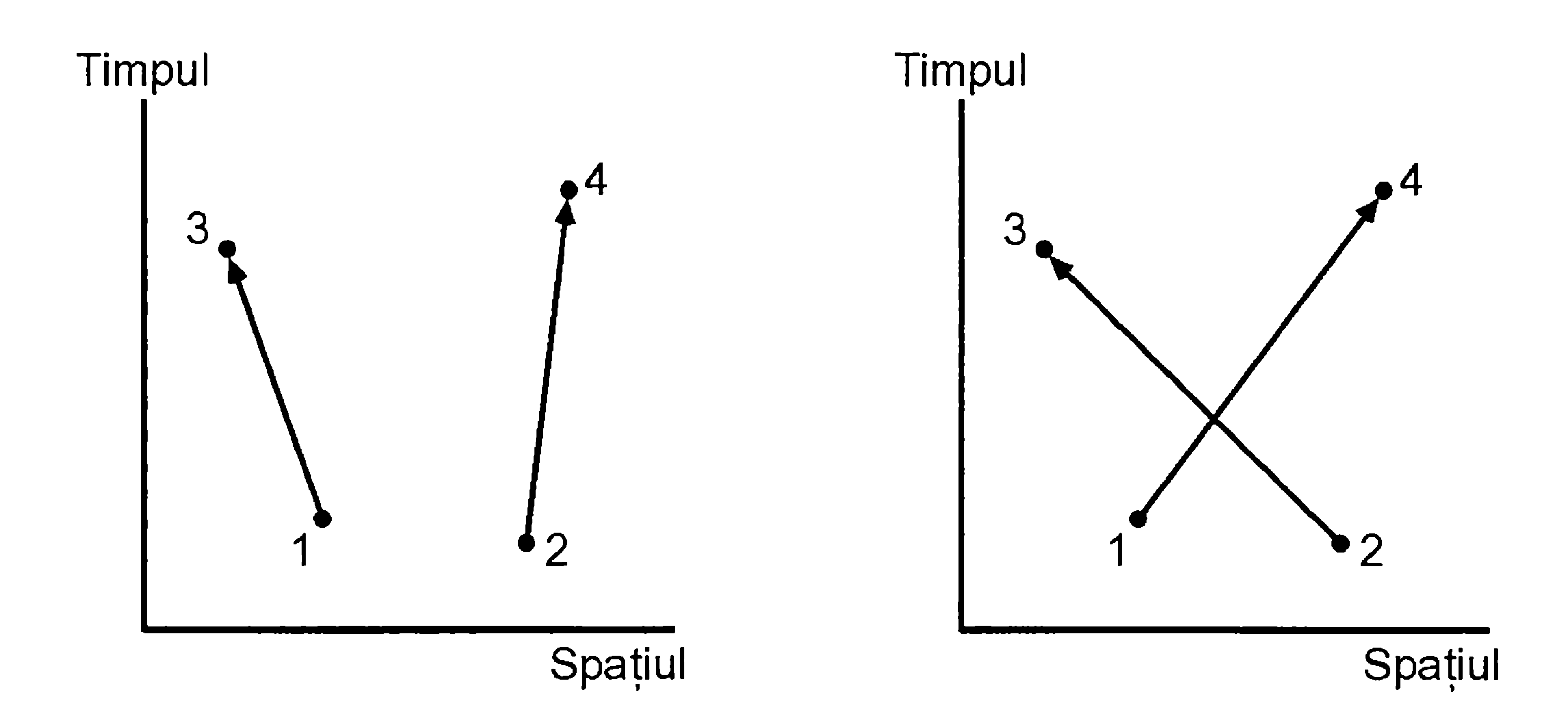


Figura 59. Pentru a calcula probabilitatea ca doi electroni, aflați în punctele 1 și 2 în spațiutimp, să ajungă în punctele 3 și 4, calculăm cu ajutorul formulei E(de la A la B) săgeata corespunzătoare „primei modalități" (în care electronul din 1 ajunge în 3, iar cel din 2 în 4), apoi calculăm săgeata corespunzătoare „celei de a doua modalități" (în care electronul din 1 ajunge în 4, încrucișându-se cu cel de la 2 la 3) și, în fine, adunăm săgețile corespunzătoare „primei modalități" și „celei de a doua modalități", obținând o bună aproximație pentru săgeata finală. (Rezultatul este corect pentru electronul artificial, simplificat, cu „spin zero". Dacă am fi ținut cont și de polarizarea electronilor, în loc să adunăm cele două săgeți corespunzătoare modalităților de producere a evenimentului, ar fi trebuit să le scădem.)

Ca atare, vom scrie expresia „săgeții pentru prima modalitate" sub forma E(de la 1 la 3) × E(de la 2 la 4).

Un alt mod în care s-ar putea petrece evenimentul, ar fi ca electronul din 1 să ajungă în 4, iar electronul din 2 să ajungă în 3 - din nou, două subevenimente concomitente. „Săgeata pentru a doua modalitate" este E(de la 1 la 4) × E(de la 2 la 3), şi ea trebuie adunată cu „săgeata pentru prima modalitate".[5]

Rezultatul reprezintă o bună aproximare pentru amplitudinea evenimentului în cauză. Pentru a face un calcul mai exact, care să concorde mai bine cu rezultatele experimentale, trebuie să luăm în considerare şi alte moduri în care s-ar putea produce acest eveniment. De pildă, pentru fiecare din cele două modalități principale amintite, unul din electroni ar putea să ajungă într-un nou şi minunat loc, în care să se descarce, emițând un foton (a se vedea Figura 60). În acest răstimp, celălalt electron ar putea ajunge într-un alt loc, în care să absoarbă un foton. Calcularea amplitudinii pentru aceste noi modalități implică înmulțirea amplitudinilor pentru: electronul din 1 ajunge în noul şi minunatul loc, 5 (unde emite un foton), iar apoi ajunge din 5 în 3; celălalt electron ajunge din 2 în celălalt loc, 6 (unde absoarbe un foton), iar apoi ajunge din 6 în 4. Trebuie să ținem minte să includem şi amplitudinea ca un foton să ajungă din 5 în 6. Voi scrie amplitudinea acestei modalități de producere a evenimentului, sub o formă matematică de nivel liceal; urmăriți-mă: E(de la 1 la 5) × *j* × E(de la 5 la 3) × E(de la 2 la 6) × *j* × E(de la 6 la 4) × F(de la 5 la 6) - o grămadă de contracții şi de rotiri. (Vă las pe dumneavoastră să stabiliți notația pentru celălalt caz, cel în care electronul din 1 ajunge în 4, iar electronul din 2 ajunge în 3.)[6]

Dar ia stați aşa: pozițiile 5 şi 6 ar putea fi oriunde în spațiu şi timp - da, oriunde - şi trebuie calculate şi adunate săgețile corespunzătoare *tuturor* acestor poziții. Se întrevede faptul că o să fie mult de lucru. Nu că regulile ar fi prea dificile - este ca la jocul de dame: regulile sunt simple, dar se folosesc iar şi iar. Deci dificultatea de calcul provine din faptul că avem de pus laolaltă atât de multe săgeți. De-asta sunt

[5] Dacă ar fi inclus efectele de polarizare a electronului, „săgeata pentru a doua modalitate" ar fi trebuit „scăzută" - rotită cu 180° şi adunată. (Mai pe larg despre aceasta, ceva mai încolo.)

[6] În cazul acestor modalități mai complicate, condițiile finale ale experimentului sunt aceleaşi ca şi în cazul celor două modalități mai simple - electronii pornesc din punctele 1 şi 2, şi sfârşesc în punctele 3 şi 4 - deci nu putem face distincție între aceste alternative şi primele. Ca atare, la cele două săgeți luate în discuție un pic mai înainte, trebuie adunate cele corespunzătoare acestor două modalități.

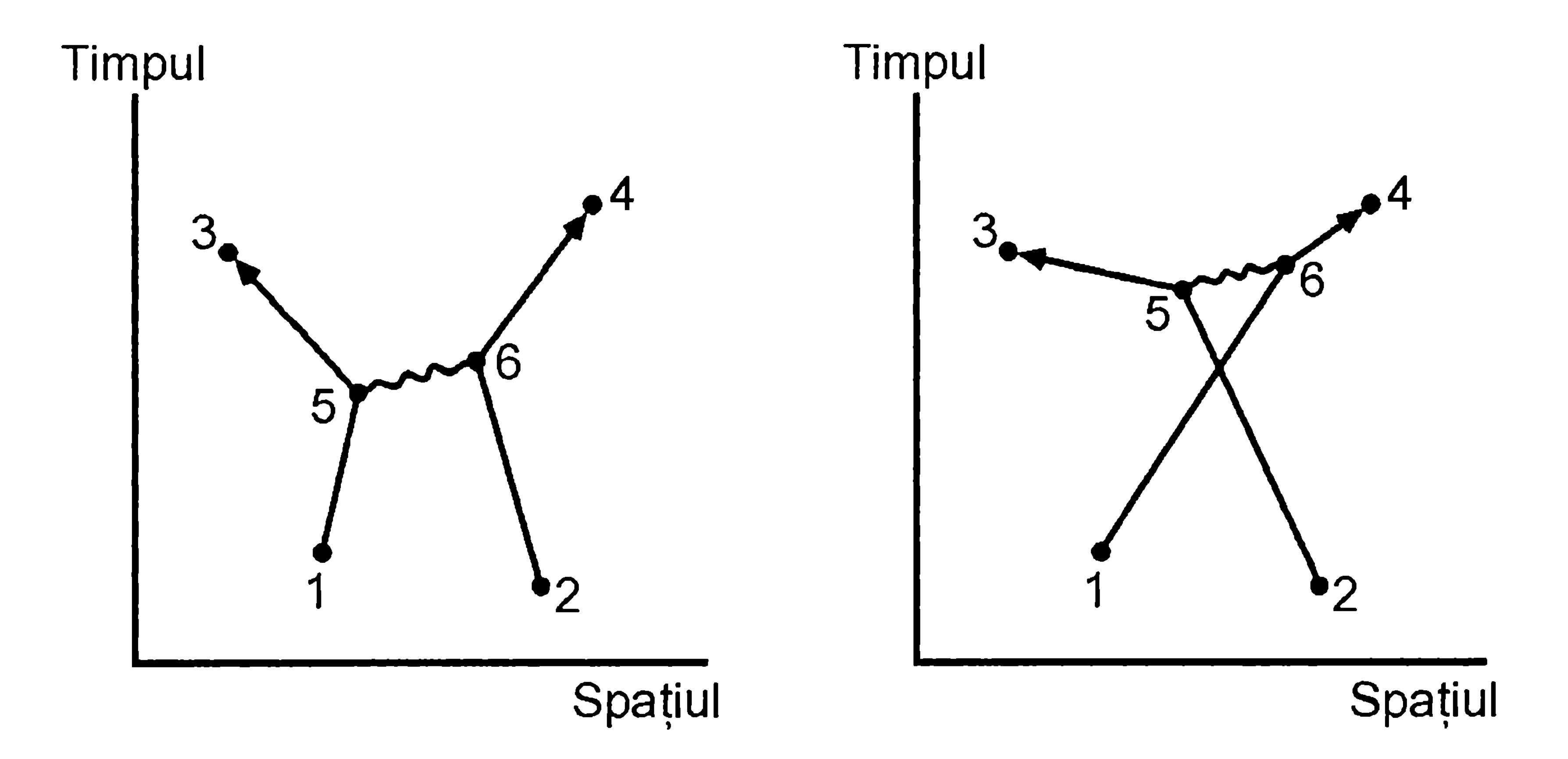


Figura 60. Două „alte maniere" în care s-ar putea petrece evenimentul din Figura 59, sunt următoarele: pentru fiecare din cazurile anterioare, un foton să fie emis în 5 și să fie absorbit în 6. Condițiile finale pentru aceste alternative sunt aceleași ca și pentru primele două – se începe cu doi electroni, și se încheie cu doi electroni – și nu se poate face distincție între rezultatele acestora și ale acelora. Ca atare, pentru a se ajunge la o aproximare mai bună în ceea ce privește săgeata finală a evenimentului, la săgețile din Figura 59 trebuie adunate săgețile corespunzătoare acestor „alte maniere".

nevoiți studenții înscriși la doctorat să muncească timp de patru ani de zile, până să învețe s-o facă în mod eficient... și încă aici avem de-a face cu o problemă *ușoară*! (Atunci când problemele devin prea dificile, le programăm pe calculator!)

Aș vrea să subliniez un lucru în legătură cu emisia și absorbția de fotoni: dacă punctul 6 este mai târziu decât punctul 5, am putea spune că fotonul a fost emis în 5 și absorbit în 6 (a se vedea Figura 61). Dacă 6 este mai devreme decât 5, atunci am putea prefera să spunem că fotonul a fost emis în 6 și absorbit în 5, dar am putea afirma tot atât de bine că fotonul se deplasează înapoi în timp! Totuși, nu trebuie să ne facem griji în legătură cu direcția în care fotonul s-a deplasat prin spațiutimp: totul este inclus în formula pentru F(de la 5 la 6), și noi spunem că cei doi electroni au „schimbat" un foton. Nu-i așa că-i minunat cât de simplă este Natura!?[7]

[7] Un astfel de foton schimbat între doi electroni, care nu apare niciodată în cadrul condițiilor inițiale sau finale ale experimentului, se mai numește uneori și „foton virtual".

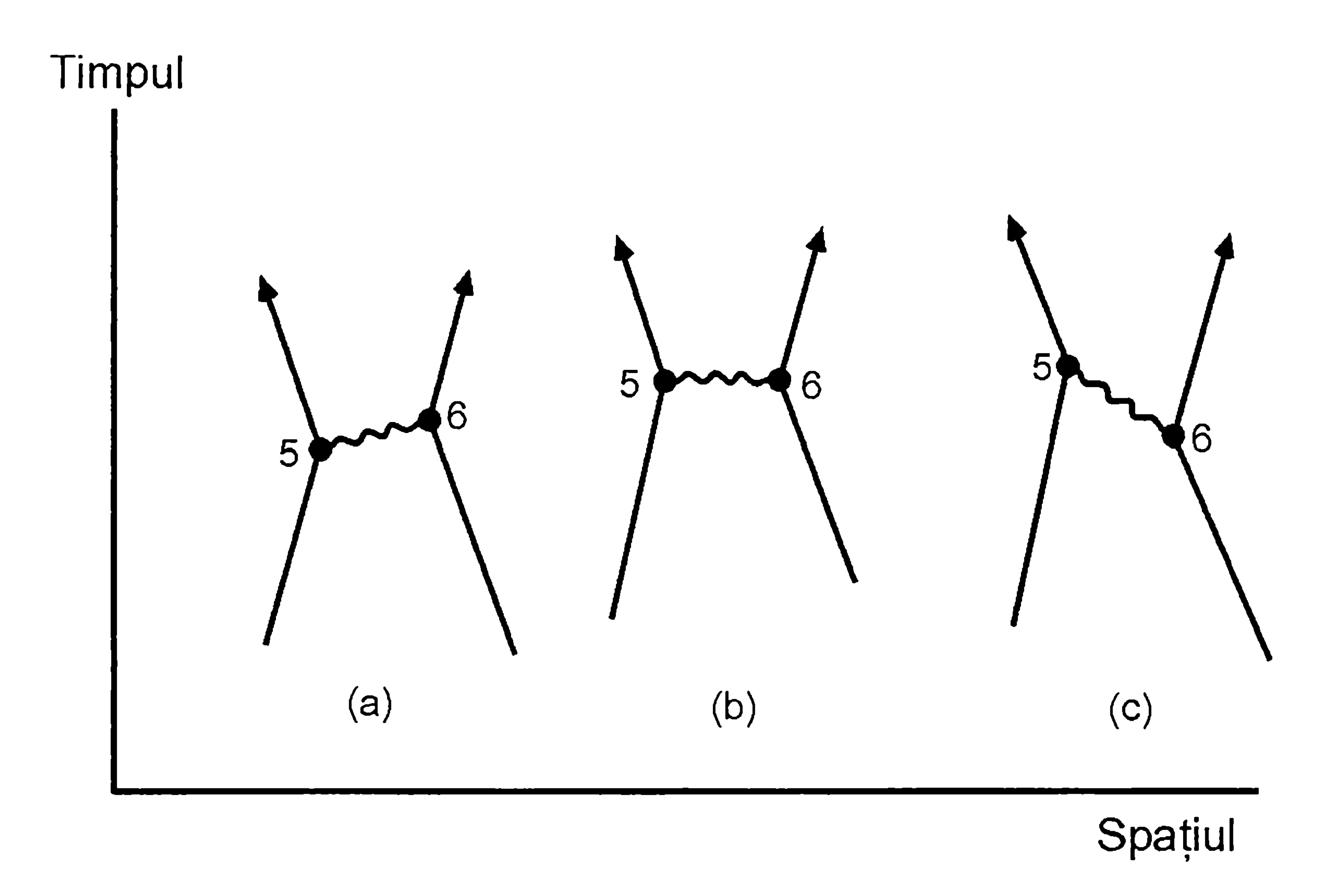


Figura 61. Întrucât lumina prezintă o amplitudine de a se propaga cu viteză mai mare sau mai mică decât viteza convențională a luminii, fotonii din toate cele trei exemple de mai sus pot fi priviți ca fiind emişi în punctul 5 şi absorbiți în punctul 6, chiar dacă fotonul din exemplul (b) este emis *în acelaşi moment* în care este absorbit, iar fotonul din exemplul (c) este emis *după* ce este absorbit - o situație în care ați fi preferat să afirmați că el a fost emis în 6 şi absorbit în 5; altminteri, fotonul ar trebui să se deplaseze *înapoi în timp*! Din perspectiva doar a calculelor (şi a Naturii), este acelaşi lucru (şi este pe de-a-ntregul posibil), aşa încât vom spune pur şi simplu că între cei doi electroni a fost „schimbat" un foton, şi vom introduce cele două poziții în expresia pentru F(de la A la B).

Acuma, în afară de fotonul care este schimbat între 5 şi 6, ar mai putea fi schimbat şi un alt foton, între alte două puncte - 7 şi 8 (a se vedea Figura 62). Sunt prea ostenit să mai scriu toate acțiunile de bază ale căror săgeți trebuie înmulțite, dar - aşa cum probabil veți fi observat - fiecare linie dreaptă primeşte un E(de la A la B), fiecare linie ondulată primeşte un F(de la A la B), şi fiecare cuplare primeşte un *j*. Astfel, există şase E(de la A la B)-uri, două F(de la A la B)-uri şi patru *j*-uri pentru *fiecare 5, 6, 7 şi 8 posibile*! Asta înseamnă miliarde de săgeți minuscule ce trebuie înmulțite, iar apoi adunate între ele!

Se vădeşte că pentru acest simplu eveniment, calcularea amplitudinii este o treabă fără sorți de izbândă, dar atunci când eşti doctorand trebuie să-ți iei diploma, aşa încât continui să o faci.

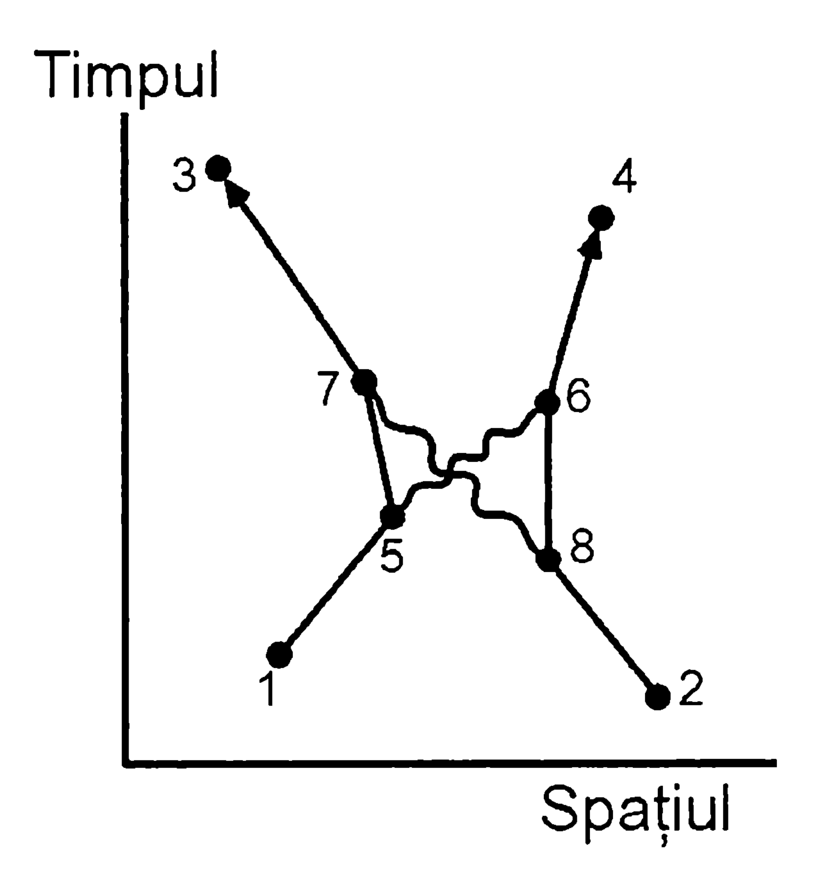


Figura 62. Încă un mod în care s-ar putea petrece evenimentul din Figura 59 ar fi ca cei doi electroni să schimbe *doi* fotoni. Sunt posibile multe diagrame corespunzătoare acestei modalități (așa după cum vom vedea mai în amănunt ceva mai târziu); una din ele este prezentată în desenul de față. Săgeata corespunzătoare acestei modalități implică toate punctele intermediare 5, 6, 7 și 8 posibile, și se calculează cu mare dificultate. Din cauza faptului că valoarea lui j este mai mică de 0,1, lungimea acestei săgeți reprezintă în general mai puțin de 1 la 10.000 (sunt implicate patru cuplări) din lungimea săgeților din Figura 59, corespunzătoare „primei modalități" și „celei de-a doua modalități", săgeți care nu conțin j-uri.

Însă *există* speranțe de succes. Ele se găsesc în acest număr magic, j. Primele două moduri în care se putea produce evenimentul nu aveau j-uri în calcule; următorul mod avea $j \times j$, iar ultimul mod studiat avea $j \times j \times j \times j$. Cum $j \times j$ face mai puțin de 0,01, înseamnă că lungimile săgeților corespunzătoare acestor modalități constituie în general mai puțin de 1% din lungimea săgeților corespunzătoare primelor două modalități; o săgeată care conține în expresia ei produsul $j \times j \times j \times j$, reprezintă mai puțin de 1% din 1% - o parte la 10.000 - din săgețile care nu conțin j-uri. Dacă lăsați calculatorul să lucreze suficient de mult timp, puteți calcula posibilitățile care implică j^6 - o parte la un milion - și vă puteți ridica la acuratețea măsurătorilor experimentale. În acest fel se determină evenimentele simple. Așa se procedează; asta-i tot!

Haideți acum să urmărim un alt eveniment. Plecăm de la un foton și un electron și în final avem tot un foton și un electron. Un

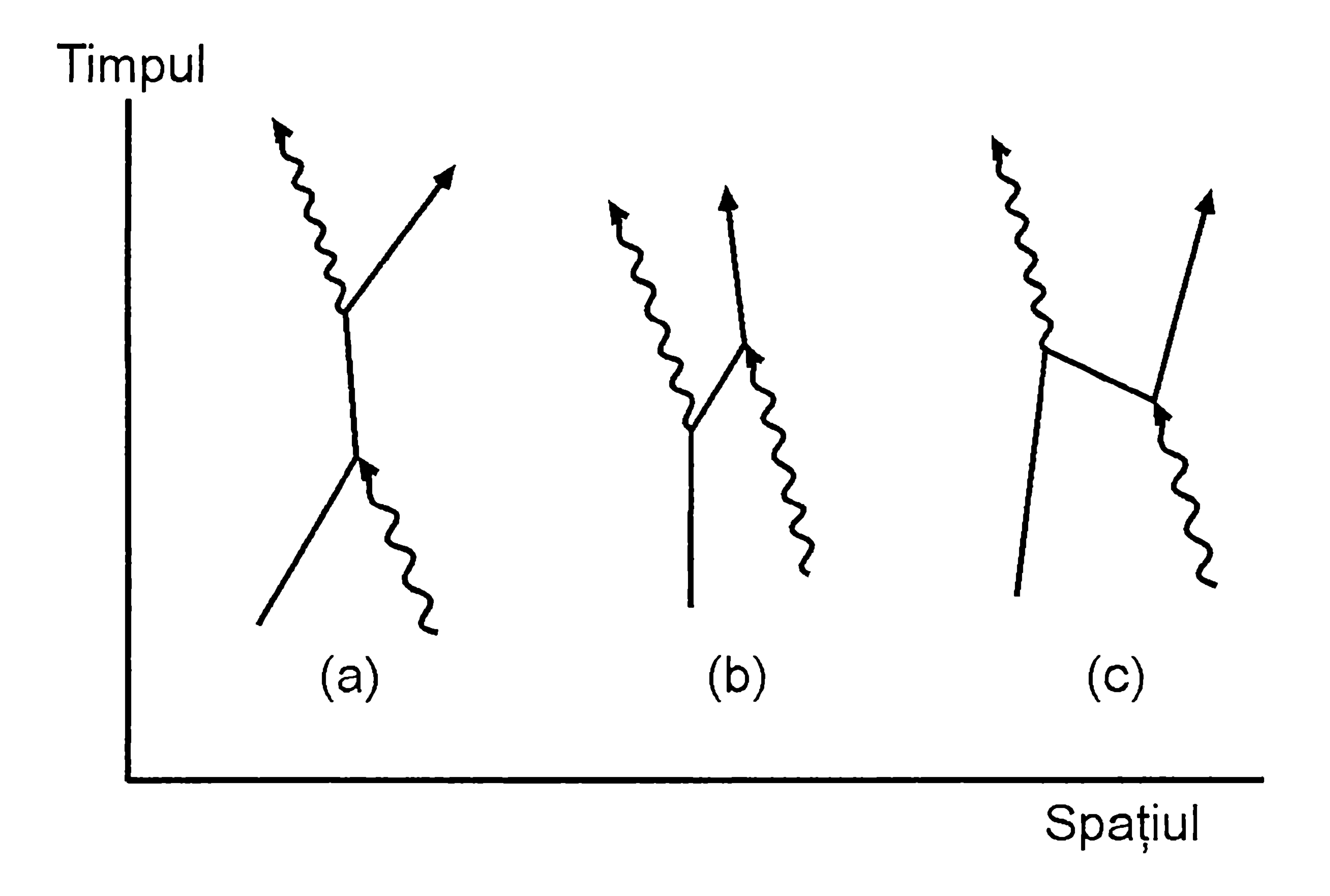


Figura 63. Împrăştierea luminii implică un foton intrând într-un electron şi un foton ieşind din electron - nu neapărat în această ordine, după cum se vede în exemplul (b). Exemplul (c) prezintă o posibilitate reală dar stranie: electronul emite un foton, se repede înapoi în timp pentru a absorbi un alt foton, după care continuă înainte în timp.

mod în care s-ar putea petrece acest eveniment este următorul: un foton este absorbit de un electron , electronul continuă scurtă vreme de unul singur, iar apoi este emis un nou foton. Acest proces se numeşte împrăştierea luminii. Atunci când facem calculele şi reprezentăm diagramele corespunzătoare împrăştierii, trebuie să includem anumite posibilităţi ciudate (a se vedea Figura 63). De exemplu, un electron ar putea emite un foton *mai înainte* de a-l absorbi (b). Însă şi mai stranie este posibilitatea ca un electron să emită un foton, iar apoi *să se deplaseze înapoi în timp* pentru a absorbi un foton, după care să o ia din nou înainte în timp (c). Traiectoria unui asemenea electron aflat „în marşarier" poate fi atât de lungă, încât să apară efectiv ca reală în cadrul unui experiment de laborator. Comportarea lui este inclusă în aceste diagrame şi în formula pentru E(de la A la B).

Atunci când este privit cu timpul curgând normal, electronul care se deplasează înapoi în timp ne apare la fel ca un electron obişnuit, doar că este atras de electronii obişnuiţi - spunem că el are

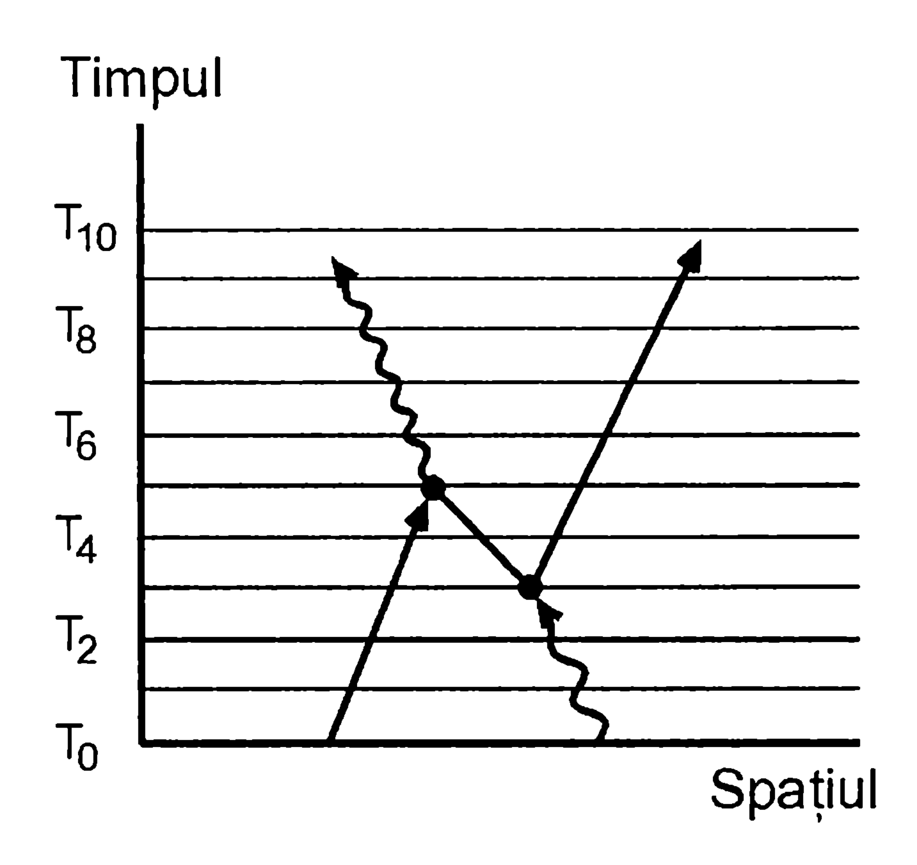


Figura 64. Urmărind exemplul (c) din Figura 63 numai în sensul normal de curgere a timpului (așa cum suntem forțați să o facem în laborator), între T_0 și T_3 observăm un electron și un foton ce se îndreaptă unul spre altul. Brusc, la momentul T_3, fotonul se „dezintegrează" și apar două particule: un electron și un tip nou de particulă (numită „pozitron"), care reprezintă un electron ce se deplasează înapoi în timp și arată ca îndreptându-se către electronul originar (către el însuși!). La momentul T_5 pozitronul se anihilează cu electronul originar, producând un nou foton. Între timp, electronul creat de fotonul de la început continuă să avanseze în spațiutimp. Această secvență de evenimente a fost efectiv observată în laborator, și este inclusă în mod automat în formula pentru E(de la A la B), fără niciun fel de modificare.

o „sarcină electrică pozitivă". (Dacă aș fi inclus în discuție efectele de polarizare, ar fi devenit evident motivul pentru care semnul lui *j* se inversează pentru electronul care dă înapoi, făcând ca sarcina lui electrică să ne apară ca fiind pozitivă.) Din acest motiv, el este numit „pozitron". Pozitronul este particula-geamănă a electronului, și constituie un exemplu de „antiparticulă".[8]

Acest fenomen este unul general. Orice particulă din natură prezintă o anumită amplitudine de a se deplasa înapoi în timp și, ca atare, posedă o antiparticulă. Atunci când o particulă și antiparticula ei se

---

[8] Dirac a avansat ideea realității existenței „antielectronilor" în 1931; un an mai târziu, Carl Anderson i-a descoperit experimental și i-a numit „pozitroni". Astăzi, putem produce ușor pozitroni (de pildă, ciocnind doi fotoni), pe care să-i păstrăm săptămâni la rând într-un câmp magnetic.

ciocnesc, ele se anihilează reciproc şi formează alte particule. (În cazul anihilării electronilor cu pozitronii, este vorba în general de unul-doi fotoni.) Şi cum rămâne cu fotonii? Fotonii arată absolut identic din toate punctele de vedere atunci când se deplasează înapoi în timp - aşa după cum am văzut mai devreme - şi deci constituie propriile lor antiparticule. Vedeţi cât de şmecheri suntem încât să facem dintr-o excepţie o parte a regulii?!

Aş dori să vă prezint cum arată pentru noi aceşti electroni care dau cu spatele, atunci când noi înaintăm în timp. Voi împărţi diagrama în intervale de timp de la T_0 la T_{10}, prin intermediul unor drepte paralele pe care să le putem urmări mai uşor (a se vedea Figura 64). Începem la momentul T_0 cu un electron şi un foton care se mişcă în sensuri opuse, unul spre altul. Deodată - la momentul T_3 - fotonul se transformă în două particule, un pozitron şi un electron. Pozitronul nu dăinuieşte prea mult: el se ciocneşte în scurt timp - la momentul T_5 - de un electron, anihilându-se reciproc şi dând naştere unui nou foton. În acest timp, electronul creat anterior de către fotonul originar îşi continuă drumul prin spaţiutimp.

Următorul lucru despre care aş dori să vorbesc este electronul în cadrul unui atom. Pentru a înţelege comportarea electronilor în atomi, trebuie să adăugăm încă un aspect, şi anume nucleul - partea masivă situată în centrul atomului, care conţine cel puţin un proton (protonul constituie o „Cutie a Pandorei", pe care o vom deschide în prelegerea următoare). În această prelegere nu vă voi oferi legile exacte ale comportării nucleului; ele sunt foarte complicate. Însă, în cazul de faţă, în care nucleul stă liniştit, putem aproxima comportarea lui cu cea a unei particule cu o anumită amplitudine de a se deplasa dintr-un loc în altul în spaţiutimp, dată de expresia E(de la A la B), dar în care n-ul ia o valoare mult mai mare. Cum nucleul este extrem de greu în comparaţie cu electronul, putem în cazul de faţă să tratăm problema considerând că în esenţă el stă pe loc, în vreme ce se deplasează în timp.

Cel mai simplu atom, numit hidrogen, înseamnă un proton şi un electron. Schimbând fotoni, protonul menţine electronul în preajmă, dansând în jurul său (a se vedea Figura 65).[9] Atomii care conţin mai mulţi protoni şi un număr corespunzător de electroni, împrăştie şi ei

[9] Amplitudinea pentru schimbul de fotoni este $(-j) \times$ F(de la A la B) $\times j$ - două cuplări plus amplitudinea ca un foton să se deplaseze dintr-un loc în altul. Amplitudinea protonului de a se cupla cu un foton este $-j$.

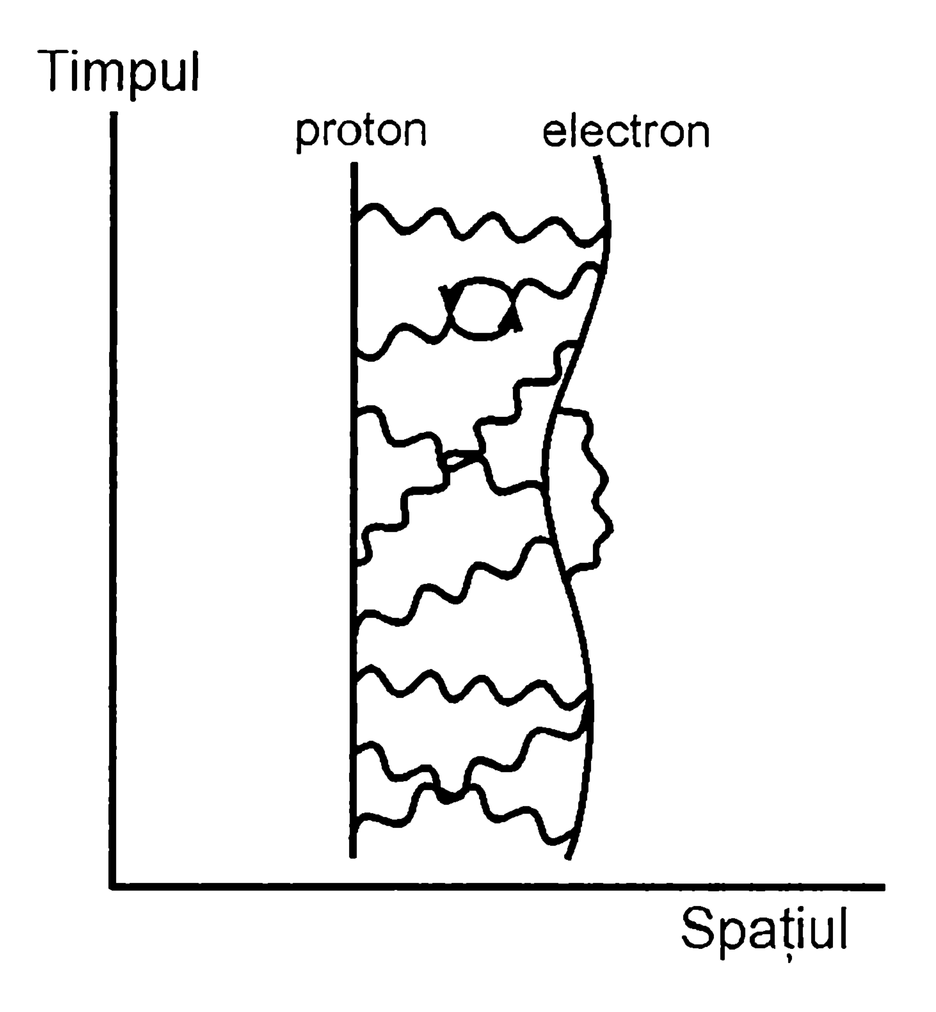


Figura 65. Un electron este menținut într-o anumită plajă de distanțe față de nucleul unui atom, prin schimb de fotoni cu un proton (o „Cutie a Pandorei“ în care ne vom uita în Capitolul 4). Pentru moment, protonul poate fi aproximat cu o particulă staționară. Pe desen este reprezentat un atom de hidrogen, alcătuit dintr-un proton și un electron, care schimbă fotoni între ei.

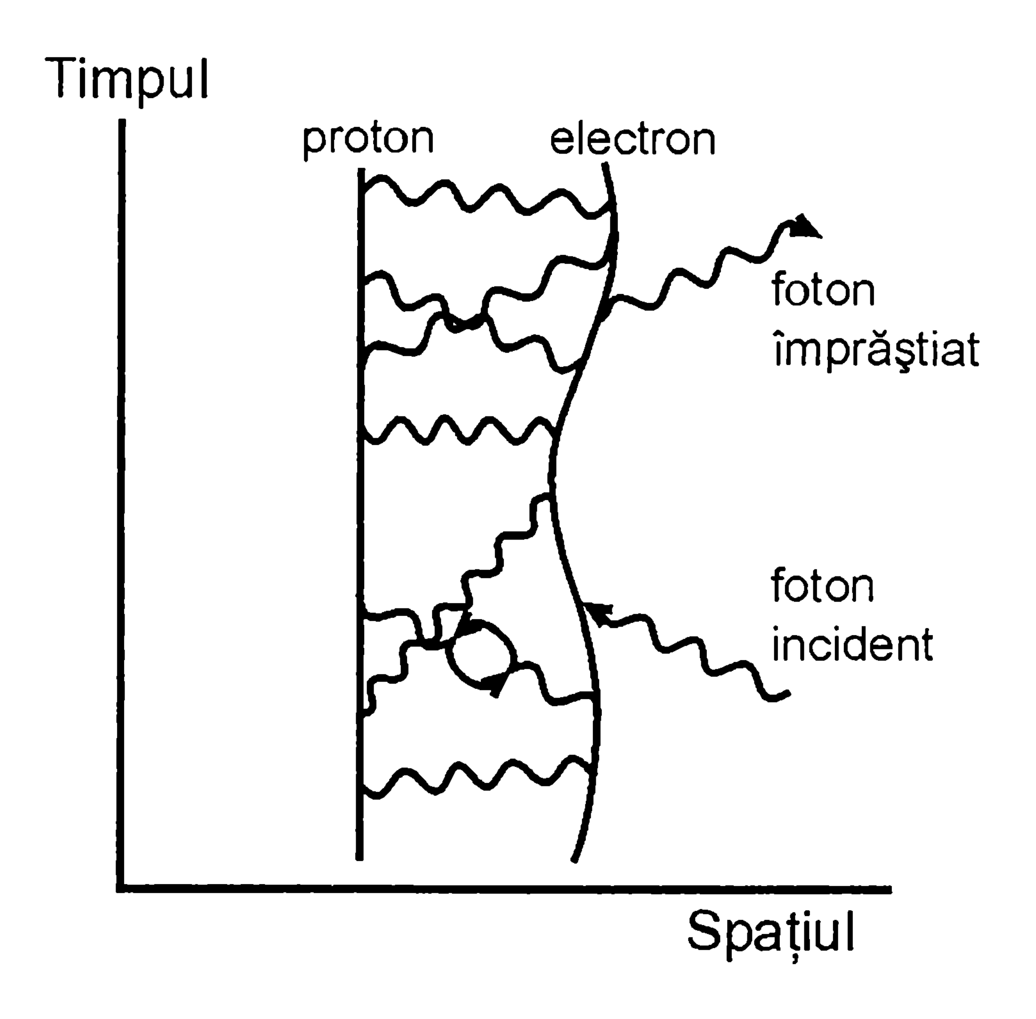


Figura 66. Fenomenul care dă socoteală de reflexia parțială pe o lamă de sticlă este împrăștierea luminii pe un electron din atom. Desenul prezintă o modalitate în care s-ar putea petrece acest eveniment în cazul unui atom de hidrogen.

lumina (atomii din aer împrăştie lumina Soarelui şi fac prin aceasta ca cerul să fie albastru), dar diagramele pentru aceşti atomi ar implica atât de multe linii drepte şi ondulate, încât nu s-ar mai înțelege absolut nimic!

Aş dori acum să vă prezint diagrama pentru un electron dintr-un atom de hidrogen, care împrăştie lumina (a se vedea Figura 66). În timp ce electronul şi nucleul schimbă fotoni, un foton vine din exteriorul atomului şi este absorbit; apoi, un nou foton este emis. (Ca de obicei, există şi alte posibilități care trebuie luate în considerare, cum ar fi aceea ca noul foton să fie emis înainte de absorbirea celui vechi.) Amplitudinea totală corespunzătoare tuturor modurilor în care un electron poate împrăştia un foton poate fi sumarizată ca o singură săgeată, ca o anumită cantitate de contracție şi rotire. (Vom nota ceva mai încolo această săgeată cu „Î".) Mărimea aceasta depinde de nucleu şi de modul în care sunt aranjați electronii în atom, şi este diferită pentru diferite materiale.

Acuma, haideți să urmărim din nou reflexia parțială a luminii pe o lamă de sticlă. Cum are ea loc? Eu m-am referit la lumină ca reflectându-se pe fața superioară şi pe fața inferioară. Conceptul de suprafață a reprezentat o simplificare, pe care am făcut-o cu scopul de a menține la început lucrurile simple. Lumina nu este propriu-zis afectată de suprafețe. Un foton incident este împrăştiat de electronii atomilor din interiorul sticlei, iar la detector urcă înapoi un foton *nou*. Este interesant faptul că, în loc să adunăm toate miliardele de săgetuțe minuscule ce reprezintă amplitudinea ca toți electronii din interiorul sticlei să împrăştie fotonul incident, noi putem aduna doar două săgeți - una pentru reflexia pe „fața superioară" şi una pentru reflexia pe „fața inferioară" - şi obține acelaşi rezultat. Haideți să vedem de ce.

Pentru a discuta din noua perspectivă reflexia luminii pe o lamă de sticlă, trebuie să luăm în considerare dimensiunea timpului. Mai înainte, atunci când am vorbit despre lumina de la o sursă monocromatică, am făcut uz de un cronometru imaginar care să măsoare timpul de mişcare al unui foton - acul cronometrului determina acolo unghiul amplitudinii corespunzătoare unui anumit drum. În formula pentru F(de la A la B) (amplitudinea ca un foton să se deplaseze dintr-un punct în altul) nu se menționează despre nicio rotire. Ce s-a întâmplat cu cronometrul? Ce s-a întâmplat cu rotirea?

În prima prelegere am afirmat doar că sursa de lumină era monocromatică. Pentru a analiza în mod corect reflexia luminii pe o lamă de sticlă, trebuie să ştim mai multe despre sursa de lumină monocromatică. În general, amplitudinea ca o sursă să emită un foton variază cu *timpul*: pe măsura trecerii timpului, unghiul amplitudinii pentru

emiterea unui foton de către sursă variază. O sursă de lumină albă - multe culori amestecate - emite fotoni într-o manieră haotică: unghiul amplitudinii se modifică brusc și neregulat, după toane. Însă atunci când construim o sursă *monocromatică*, realizăm un dispozitiv care a fost atent potrivit pentru ca amplitudinea de emitere a unui foton la un anumit moment de timp să fie ușor calculabilă: ea își modifică unghiul cu viteză *constantă*, asemenea acului unui cronometru. (De fapt, această săgeată se rotește cu aceeași viteză ca acul cronometrului utilizat anterior, dar în sens opus - a se vedea Figura 67.)

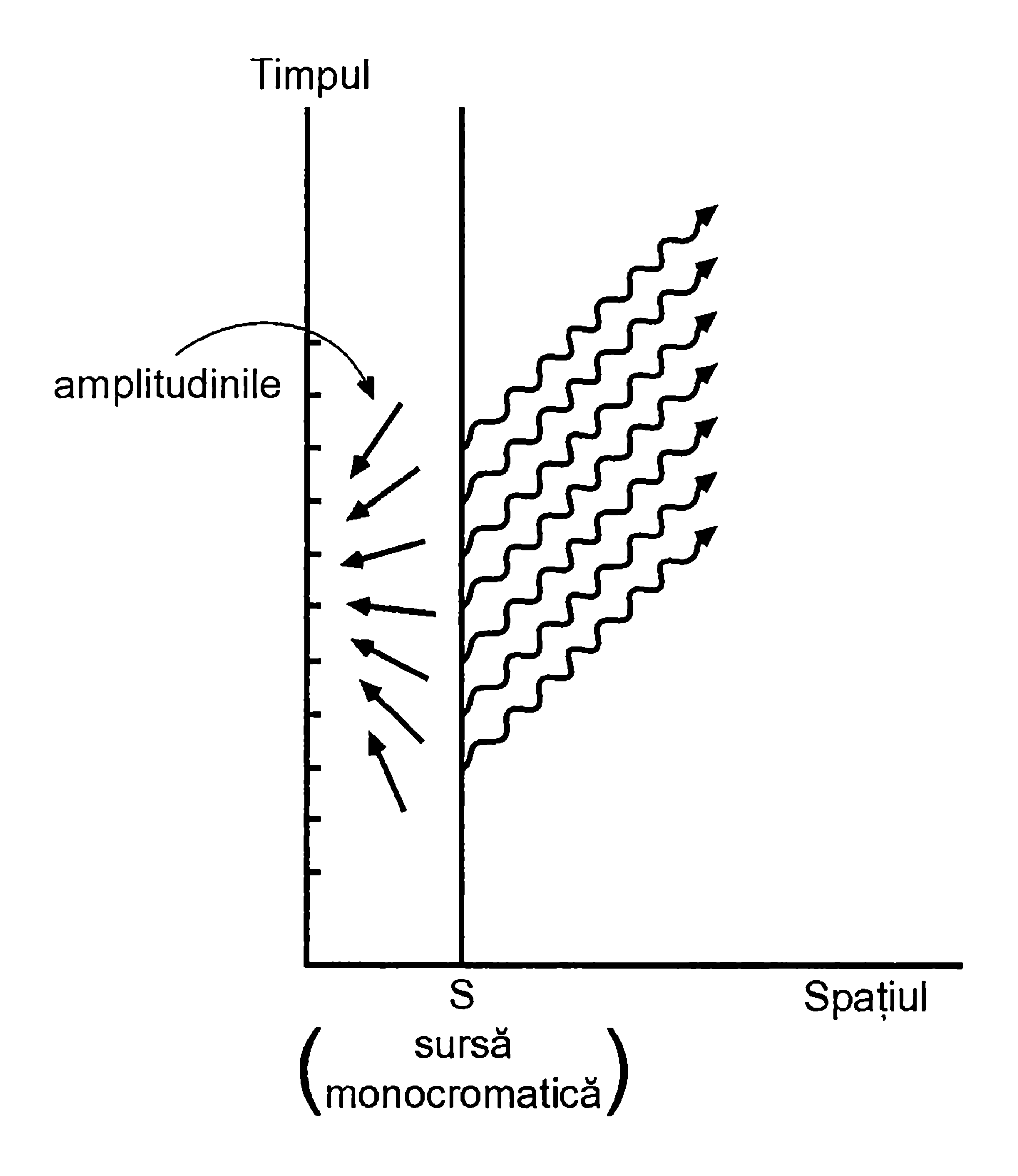


Figura 67. O sursă monocromatică este un aparat minunat construit, care emite fotoni de o manieră foarte predictibilă: pe măsura trecerii timpului, amplitudinea de emitere a unui foton la un anumit *moment de timp* se rotește în sens invers acelor de ceasornic. Astfel, amplitudinea ca sursa să emită un foton la un moment de timp de mai târziu are un unghi mai mic. Se va admite că toată lumina emisă de sursă se propagă cu viteza c (întrucât distanțele sunt mari).

Viteza de rotație depinde de culoarea luminii: amplitudinea pentru o sursă albastră se rotește de aproape două ori mai repede decât cea pentru o sursă roșie, exact ca mai înainte. Deci, contorul folosit de noi drept „cronometru imaginar" era sursa monocromatică: în realitate, unghiul corespunzător amplitudinii pentru un drum dat depinde de *momentul* la care fotonul este emis de sursă.

Odată fotonul emis, nu mai există vreo rotire ulterioară a săgeții în timpul deplasării fotonului dintr-un punct în altul în spațiutimp. Chiar dacă expresia F(de la A la B) ne spune că există o amplitudine ca lumina să se propage dintr-un loc în altul cu viteze *altele* decât *c*, în experimentul nostru distanța de la sursă la detector este relativ mare (în comparație cu un atom) și deci singura contribuție nenulă care să conteze la lungimea lui F(de la A la B) vine din partea lui *c*.

Ca punct de plecare în noul nostru calcul pentru reflexia parțială, haideți să începem prin a defini complet evenimentul: detectorul din punctul A clicăie la un anumit *moment de timp* T. Apoi haideți să împărțim stratul de sticlă într-un număr de secțiuni foarte subțiri - să zicem, șase (a se vedea Figura 68(a)). Din analiza făcută în cea de-a doua prelegere, în care am găsit că aproape întreaga lumină este reflectată de mijlocul oglinzii, știm că, deși fiecare electron împrăștie lumina în toate direcțiile, atunci când se adună toate săgețile pentru o secțiune dată, singurul loc în care ele nu se anulează reciproc este acolo unde lumina coboară drept în jos, în mijlocul secțiunii, și se împrăștie în una din următoarele două direcții: drept în sus, înapoi la detector, sau drept în jos, prin sticlă. Ca atare, săgeata finală corespunzătoare evenimentului, se va determina prin adunarea celor șase săgeți reprezentând împrăștierea luminii pe cele șase puncte din mijloc - de la X_1 la X_6 - așezate vertical de-a lungul grosimii lamei.

În regulă; haideți să calculăm săgeata pentru fiecare din cele șase moduri în care s-ar putea propaga lumina - via cele șase puncte, de la X_1 la X_6. În fiecare astfel de modalitate sunt implicați patru pași (ceea ce înseamnă că se vor înmulți patru săgeți):

PASUL nr. 1: Un foton este emis de sursă la un anumit moment de timp dat.
PASUL nr. 2: Fotonul se deplasează de la sursă la unul din punctele din sticlă.
PASUL nr. 3: În acel punct fotonul este împrăștiat de un electron.
PASUL nr. 4: Un nou foton urcă până la detector.

Vom afirma că amplitudinile pentru pașii 2 și 4 (un foton se deplasează înspre sau dinspre un punct din sticlă) nu implică nicio contracție ori rotire, deoarece putem presupune că niciun pic de lumină nu se rătăcește sau nu se răspândește între sursă și sticlă sau între sticlă și detector. Pentru pasul 3 (un electron împrăștie un foton), amplitudinea corespunzătoare împrăștierii reprezintă o constantă - o contracție și o rotire cu o anumită cantitate, Î - și este aceeași oriunde în sticlă. (Această mărime este, așa cum am menționat mai înainte, diferită pentru diferite materiale. Pentru sticlă, rotirea lui Î este de 90°.) În consecință, din cele patru săgeți de înmulțit, doar săgeata pentru pasul 1 - amplitudinea corespunzătoare emiterii unui foton de către sursă la un anumit moment de timp - diferă de la o variantă la alta.

Momentul de timp la care ar trebui emis un foton pentru a ajunge la detector la momentul T (a se vedea Figura 68(b)) nu este același pentru cele șase diferite drumuri. Un foton împrăștiat de X_2 va fi trebuit emis un pic *mai devreme* decât unul împrăștiat de X_1, pentru că drumul este mai lung. Ca atare, săgeata de la momentul T_2 este un pic mai rotită decât cea de la T_1, deoarece amplitudinea ca o sursă monocromatică să emită un foton la un anumit moment de timp, se rotește în sens invers acelor de ceasornic odată cu trecerea timpului. Același lucru este valabil pentru fiecare din săgeți, până la ultima, de la T_6: toate cele șase săgeți au aceeași lungime, dar sunt rotite cu diferite unghiuri - adică, sunt orientate în diferite direcții - din cauză că ele reprezintă un foton emis de sursă la momente de timp diferite.

După contracția săgeții de la momentul T_1 cu cantitățile prevăzute pentru pașii 2, 3 și 4 - și după rotirea ei cu 90°, prevăzută pentru pasul 3 - obținem săgeata 1 (a se vedea Figura 68(c)). Același lucru este valabil și pentru săgețile 2-6. Astfel, săgețile 1 până la 6 au aceeași lungime (contractată) și sunt rotite una în raport cu alta cu exact aceleași cantități ca și săgețile de plecare, de la momentele T_1 până la T_6.

În continuare, adunăm săgețile 1-6. Punând săgețile în ordine de la 1 la 6, obținem ceva asemănător unui arc de cerc. Săgeata finală este dată de coarda acestui arc. Lungimea săgeții finale crește cu grosimea sticlei - un strat mai gros înseamnă mai multe secțiuni, deci mai multe săgeți, deci un arc de cerc mai mare... până când se ajunge la un semicerc (și săgeata finală este diametrul lui). După aceea, pe măsură ce grosimea sticlei continuă să crească, lungimea săgeții finale *descrește* și cercul devine întreg, ciclul repetându-se. Pătratul acestei lungimi reprezintă probabilitatea evenimentului, și ea variază într-un ciclu de la zero la 16%.

(a)

Sursă de lumină

A

X_1

X_6

(b)

Timpul

S A

sticlă

T

amplitudinile

(via X_1) T_1

T_2

T_3

T_4

T_5

(via X_6) T_6

(sursă monocromatică)

S

A (detector)

X_1

X_6

(sticlă)

Spațiul

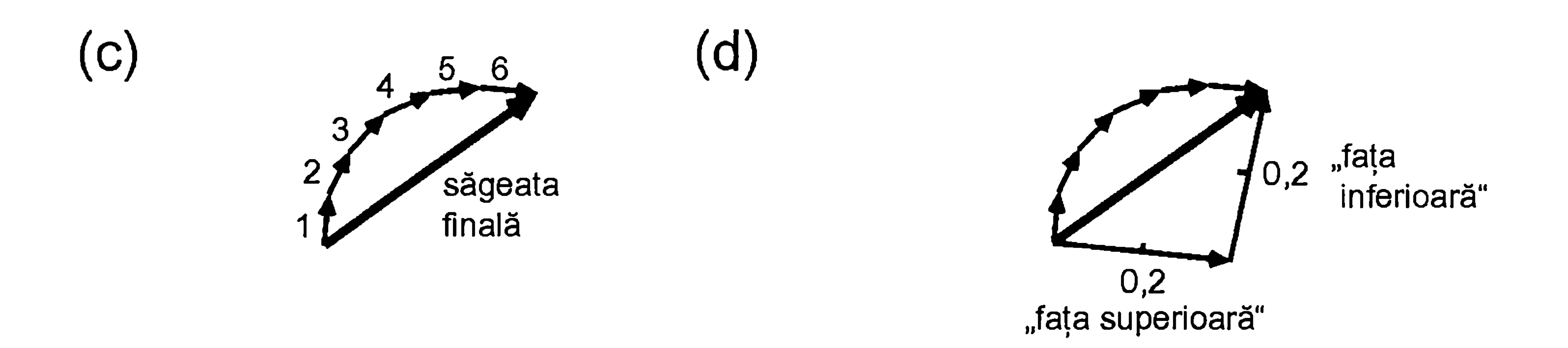


Figura 68. Ne începem noua analiză a reflexiei parţiale împărţind un strat de sticlă într-un anumit număr de secţiuni (în cazul de faţă, şase) şi urmărind diferitele moduri în care lumina s-ar putea propaga de la sursă la sticlă şi înapoi la detectorul din A. Singurele puncte importante din sticlă (unde amplitudinea corespunzătoare împrăştierii luminii nu se anulează) sunt localizate la mijlocul fiecărei secţiuni; în desenul (a) sunt prezentate punctele de la X_1 la X_6, aşa cum sunt poziţionate ele fizic în interiorul sticlei, iar în desenul (b) ele sunt reprezentate ca linii verticale pe diagrama spaţiu-timp. Evenimentul a cărui probabilitate o calculăm este: detectorul clicăie la un anumit moment de timp T. Astfel, el ne apare pe diagrama spaţiu-timp ca un punct (intersecţia lui A cu T).
Pentru fiecare din modalităţile în care se poate petrece evenimentul, trebuie să aibă loc patru paşi succesivi, deci trebuie să înmulţim patru săgeţi. Paşii sunt prezentaţi în desenul (b): 1) un foton părăseşte sursa la un anumit moment de timp (săgeţile din dreptul momentelor T_1 până la T_6 reprezintă amplitudinile de emitere pentru cele şase momente diferite); 2) fotonul se deplasează de la sursă la unul din punctele din sticlă (cele şase alternative sunt reprezentate sub formă de linii ondulate orientate către colţul din dreapta-sus); 3) un electron situat în dreptul unuia din acele puncte împrăştie un foton (reprezentat sub forma unei scurte linii groase verticale); 4) un foton nou se deplasează către detector şi ajunge la ora fixată, T (reprezentat ca o linie ondulată orientată către colţul din stânga-sus). Amplitudinile pentru paşii 2, 3 şi 4 sunt la fel pentru toate cele şase variante, în vreme ce pentru pasul 1 amplitudinea diferă: în comparaţie cu un foton împrăştiat de un electron aflat în partea de sus a sticlei (în punctul X_1), un foton împrăştiat mai în adâncimea sticlei - de pildă, în punctul X_2 - trebuie să părăsească sursa ceva mai devreme, la momentul T_2.
După ce terminăm de înmulţit cele patru săgeţi pentru fiecare variantă, săgeţile rezultate, reprezentate în desenul (c), sunt mai scurte decât cele din desenul (b); iar fiecare din ele a fost rotită cu 90° (potrivit caracteristicii împrăştierii fotonilor pe electroni în sticlă). Atunci când aceste şase săgeţi sunt adunate în ordinea dată, ele formează un arc de cerc; coarda corespunzătoare acestui arc reprezintă săgeata finală. Aceeaşi săgeată finală poate fi obţinută trasând două raze vectoare, reprezentate în desenul (d), şi „scăzându-le“ (adică, inversând sensul săgeţii corespunzătoare „feţei superioare“ şi adunând-o pe aceasta cu cea corespunzătoare „feţei inferioare“). Această scurtătură a fost folosită ca simplificare în prima prelegere.

Există o şmecherie matematică pe care o putem utiliza pentru a obţine acelaşi rezultat (a se vedea Figura 68(d)): dacă trasăm din centrul „cercului" o săgeată până în coada săgeţii 1 şi alta până în vârful săgeţii 6, obţinem două raze vectoare. Dacă pe prima dintre acestea o răsucim cu 180° (o „scădem"), atunci, prin compunerea ei cu cealaltă, obţinem săgeata finală! Asta făceam în prima noastră prelegere: aceste două raze constituie săgeţile despre care spuneam că reprezintă reflexiile pe „faţa superioară" şi pe „faţa inferioară". Ambele au faimoasa lungime 0,2.[10]

Aşadar, putem obţine rezultatul corect pentru probabilitatea de reflexie parţială, închipuindu-ne (în mod fals) că toată reflexia provine numai de pe feţele superioară şi inferioară. În această analiză uşoară din punct de vedere intuitiv, săgeţile corespunzătoare „feţei superioare" şi „feţei inferioare" constituie simple construcţii matematice care ne conduc la răspunsul corect, pe când analiza pe care tocmai am făcut-o - cu diagrame spaţiu-timp şi săgeţi care formează un arc de cerc - constituie o reprezentare mai corectă a ceea ce se întâmplă de fapt: reflexia parţială reprezintă împrăştierea luminii pe electronii *din interiorul* sticlei.

Acuma, cum rămâne treaba cu lumina care trece *prin* stratul de sticlă? În primul rând, există o amplitudine ca fotonul să treacă drept prin sticlă, fără să ciocnească vreun electron (a se vedea Figura 69(a)). Ca lungime, săgeata acesteia este cea mai importantă. Dar mai există alte şase moduri în care un foton ar putea ajunge la detectorul de sub sticlă: el ar putea să lovească un electron în X_1, iar noul foton să se împrăştie drept în jos, spre B; sau ar putea lovi un electron în X_2, iar noul foton să se împrăştie drept în jos, spre B; şi aşa mai departe. Aceste şase săgeţi au fiecare aceeaşi lungime ca săgeţile care au format „arcul de cerc" din exemplul anterior: valoarea acestei lungimi are la bază aceeaşi amplitudine ca un electron din sticlă să împrăştie un

---

[10] În mod evident, raza arcului de cerc depinde de *lungimea* săgeţilor corespunzătoare fiecărei secţiuni, care, în ultimă instanţă, este determinată de amplitudinea Î ca un electron dintr-un atom de sticlă să împrăştie un foton. Această rază poate fi calculată aplicând multitudinii de schimburi de fotoni implicate, formulele pentru cele trei acţiuni de bază, şi sumând amplitudinile corespunzătoare. Este o problemă foarte dificilă, dar, pentru substanţe relativ simple, raza a fost calculată cu un considerabil succes, iar variaţia razei de la substanţă la substanţă este destul de bine înţeleasă pe baza acestor idei ale electrodinamicii cuantice. Totuşi, trebuie spus că pentru o substanţă atât de complexă precum sticla, nu s-au efectuat nicidecum calculele directe pornind de la principiile de bază. În astfel de cazuri, raza se determină experimental. Pentru sticlă, s-a găsit pe cale experimentală că raza este aproximativ 0,2 (în cazul în care lumina cade drept pe sticlă, la 90°).

foton, Î. Numai că, de această dată, toate cele şase săgeţi sunt orientate în aceeaşi direcţie, deoarece lungimile tuturor celor şase drumuri care implică o împrăştiere sunt egale. Pentru substanţe transparente precum sticla, direcţia acestor săgeţi minuscule este perpendiculară pe săgeata principală. Atunci când adunăm săgeata principală şi săgeţile minuscule, obţinem o săgeată finală care are esenţialmente aceeaşi lungime cu săgeata principală, dar este puţin rotită pe altă direcţie. Cu cât sticla este mai groasă, cu atât sunt mai multe săgeţi minore, şi cu atât mai rotită este săgeata finală. Aşa funcţionează propriu-zis o lentilă convergentă: punând în calea drumurilor mai scurte ale luminii grosimi ceva mai mari ale sticlei, putem face ca săgeţile finale să fie orientate în aceeaşi direcţie pentru toate drumurile posibile.

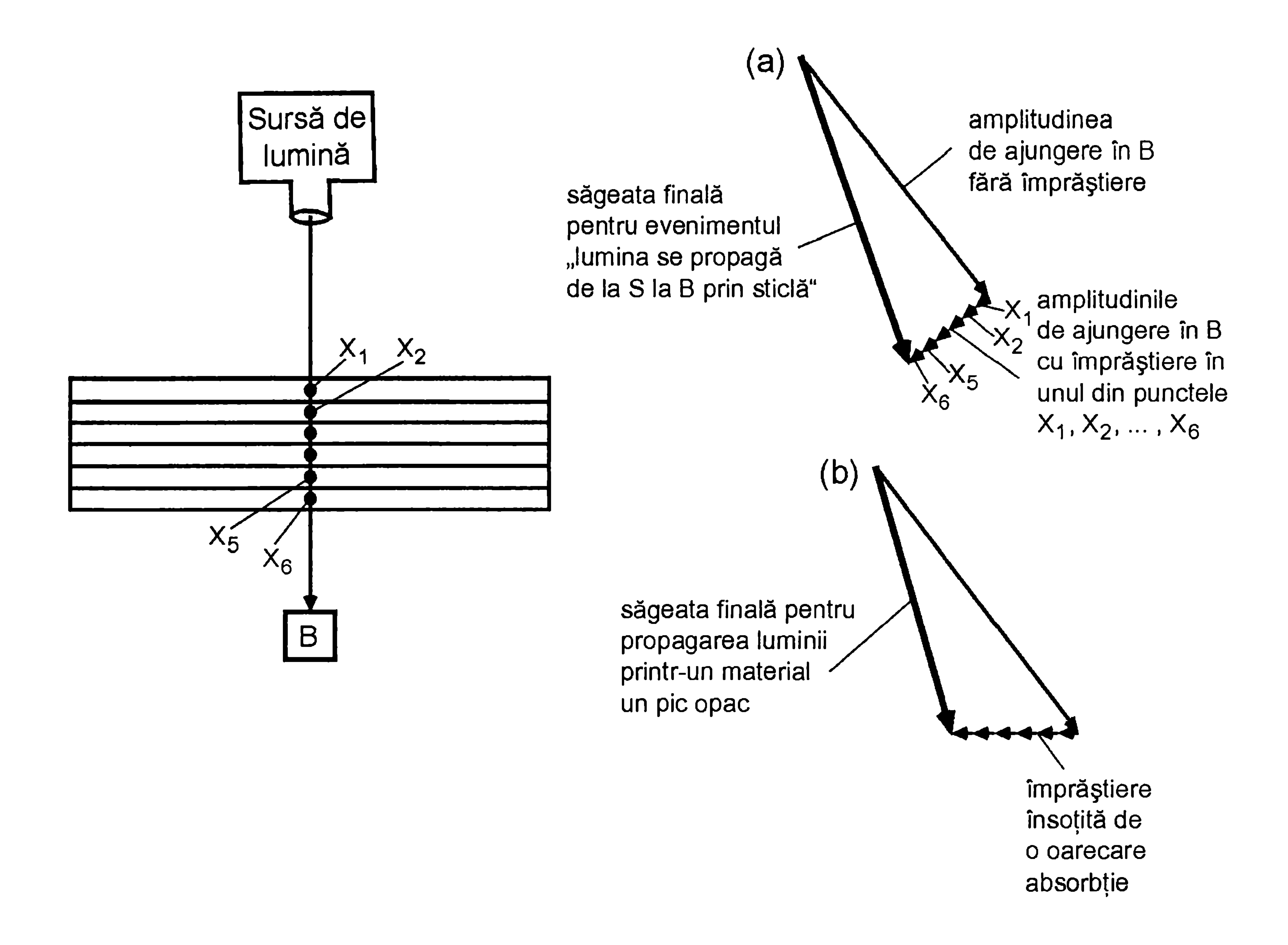
Acelaşi efect ar apărea şi dacă fotonii s-ar deplasa mai încet prin sticlă decât prin aer: am avea o rotire suplimentară a săgeţii finale. Acesta este motivul pentru care am afirmat mai devreme că lumina ne apare ca propagându-se mai lent prin sticlă (ori prin apă) decât prin aer. În realitate, „încetinirea“ luminii reprezintă o rotire suplimentară cauzată de atomii din sticlă (ori din apă) pe care se împrăştie lumina. Măsura în care apare o rotire suplimentară a săgeţii finale atunci când lumina se propagă printr-un mediu, se numeşte „indicele de refracţie“ al acelui material.[11]

Pentru substanţele care absorb lumină, săgeţile minuscule sunt orientate la unghiuri mai mici de 90° faţă de săgeata principală (a se vedea Figura 69(B)). Aceasta face ca săgeata finală să fie mai scurtă decât săgeata principală, indicând faptul că probabilitatea ca un foton să se deplaseze prin sticlă parţial opacă este mai mică decât prin sticlă transparentă.

Prin urmare, avem că toate fenomenele şi numerele arbitrare menţionate în primele două prelegeri - cum ar fi amplitudinea de 0,2 pentru reflexia parţială, „încetinirea“ luminii prin apă şi sticlă, şi aşa

---

[11] Fiecare din săgeţile corespunzătoare reflexiei pe o secţiune (şi care formează un „arc de cerc“) au aceeaşi lungime cu săgeţile care fac să se rotească mai mult sau mai puţin săgeata finală pentru transmisie. Prin urmare, există o relaţie între reflexia parţială pe un material şi indicele lui de refracţie.
Se vădeşte că săgeata finală a devenit mai mare ca 1, ceea ce înseamnă că prin sticlă iese mai multă lumină decât intră! Ni se pare aşa din cauză că nu am luat în considerare amplitudinile ca un foton să coboare până la una din secţiuni, un foton nou să se împrăştie în sus până la o alta, iar apoi un al treilea foton să se împrăştie din nou în jos prin sticlă - precum şi alte multe posibilităţi complicate - care au ca rezultat curbarea micilor săgeţi şi menţinerea valorii săgeţii finale între 0,92 şi 1 (deci, probabilitatea totală ca lumina să fie reflectată sau transmisă de lama de sticlă este totdeauna 100%).



Sursă de lumină
X_1
X_2
X_5
X_6
B
(a)
amplitudinea de ajungere în B fără împrăştiere
săgeata finală pentru evenimentul „lumina se propagă de la S la B prin sticlă“
amplitudinile de ajungere în B cu împrăştiere în unul din punctele $X_1, X_2, \ldots, X_6$
X_1
X_2
X_5
X_6
(b)
săgeata finală pentru propagarea luminii printr-un material un pic opac
împrăştiere însoțită de o oarecare absorbție

Figura 69. Amplitudinea cea mai mare pentru lumina care este transmisă printr-o lamă de sticlă către detectorul din punctul B, provine de la acea parte care nu implică nicio împrăştiere pe electronii atomilor din sticlă, parte reprezentată în desenul (a). Acestei săgeți îi adunăm şase mici săgeți care corespund împrăştierii luminii în fiecare din secțiunile reprezentate de punctele X_1-X_6. Aceste şase săgeți au lungimi egale (deoarece amplitudinea de împrăştiere este aceeaşi oriunde în sticlă) şi sunt orientate în aceeaşi direcție (pentru că lungimile tuturor drumurilor de la sursă la detectorul din B, via oricare din punctele X, sunt egale). După adunarea săgeții mari şi a celor mici, găsim că săgeata finală pentru transmisia luminii printr-o lamă de sticlă este rotită ceva mai mult decât ne-am fi aşteptat dacă lumina ar fi trecut doar direct, fără împrăştiere. Acesta este motivul pentru care nouă ne apare că luminii îi ia mai mult timp să se propage prin sticlă decât prin vid ori prin aer. Cantitatea cu care se roteşte săgeata finală din cauza electronilor din interiorul unui material se numeşte „indice de refracție".
Pentru medii transparente, micile săgeți sunt perpendiculare pe săgeata principală (de fapt, atunci când luăm în considerare şi împrăştierile duble ori triple, ele se curbează un pic, împiedicând săgeata finală să devină mai mare decât săgeata principală: Natura a aranjat în toate situațiile lucrurile astfel încât să nu obținem niciodată mai multă lumină decât s-a emis. Pentru materiale parțial opace - care absorb într-o oarecare măsură lumina - săgețile mici sunt orientate mai înspre săgeata principală, rezultând astfel o săgeată finală sensibil mai scurtă decât era de aşteptat, reprezentată în desenul (b). Această săgeată finală mai scurtă corespunde unei probabilități mai mici ca un foton să fie transmis printr-un material parțial opac.

mai departe - sunt explicate mai în amănunt de doar cele trei acțiuni de bază - trei acțiuni care, în fapt, explică de asemenea şi aproape orice altceva.

Este greu de crezut că aproape întreaga vastă varietate vizibilă în natură rezultă din monotonia combinării repetate a doar acestor trei acțiuni de bază. Dar aşa este. Voi scoate un pic în evidență modul în care apare această varietate.

Am putea începe cu fotonii (a se vedea Figura 70). Care este probabilitatea ca doi fotoni, aflați în punctele 1 şi 2 în spațiutimp, să ajungă la doi detectori, situați în punctele 3 şi 4? Există două maniere principale în care s-ar putea petrece acest eveniment, şi fiecare depinde de două lucruri care să se întâmple concomitent: fotonii ar putea să se ducă direct - F(de la 1 la 3) × F(de la 2 la 4) - sau ar putea să se „intersecteze" - F(de la 1 la 4) × F(de la 2 la 3). Amplitudinile rezultante pentru aceste două posibilități se adună şi se produce interferență (după cum am văzut în a doua prelegere), făcând ca lungimea săgeții finale să varieze în funcție de poziția relativă a punctelor în spațiutimp.

Şi dacă am face ca punctele 3 şi 4 să coincidă în spațiutimp (a se vedea Figura 71)? Haideți să zicem că ambii fotoni sfârşesc în punctul 3, şi să vedem cum afectează acest lucru probabilitatea evenimentului. Avem acum F(de la 1 la 3) × F(de la 2 la 3) şi respectiv F(de la 2 la 3) × F(de la 1 la 3), ceea ce conduce la două săgeți identice. Atunci când le adunăm, suma lor este dublul lungimii fiecăreia din ele, şi produce o săgeată finală al cărei pătrat este de patru ori mai mare decât cel al fiecărei săgeți luate individual. Din cauza faptului că cele două săgeți sunt identice, ele sunt întotdeauna „aliniate". Cu alte cuvinte, interferența nu fluctuează în raport cu distanța relativă dintre punctele 1 şi 2: ea este mereu constructivă. Dacă nu ne-am gândi la interferența mereu constructivă a celor doi fotoni, am crede că, în medie, se obține dublul probabilității. Când colo, tot timpul se obține de patru ori probabilitatea. Atunci când sunt implicați mulți fotoni, această probabilitate mai mare decât ne-am fi aşteptat, creşte încă şi mai mult.

Acest fapt generează o serie de efecte practice. Putem spune că fotonii tind să ajungă într-o aceeaşi situație, sau „stare" (felul în care variază în spațiu amplitudinea de a găsi un foton). Şansa ca un atom să emită un foton este amplificată dacă sunt deja prezenți un număr de fotoni (într-o stare în care atomul respectiv să-i fi putând emite). Acest fenomen de „emisie stimulată" a fost descoperit de Einstein atunci când, propunând pentru lumină modelul fotonilor, a deschis calea teoriei cuantice. Laserul funcționează pe baza acestui fenomen.

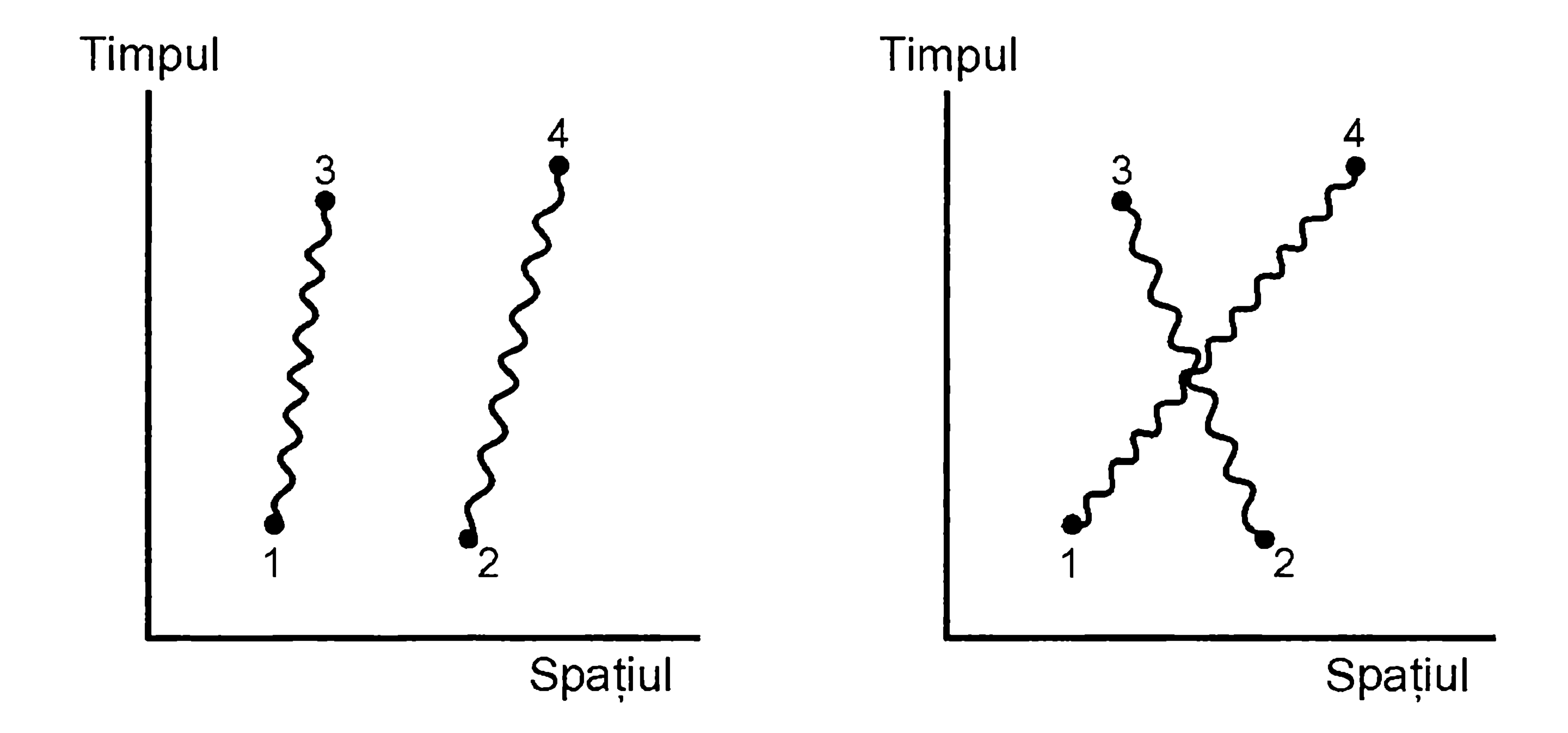


Figura 70. Fotonii din punctele 1 și 2 în spațiutimp au o anumită probabilitate de ajungere în punctele 3 și 4, ce poate fi aproximată prin considerarea celor două modalități principale de petrecere a evenimentului, reprezentate mai sus: F(de la 1 la 3) × F(de la 2 la 4) și respectiv F(de la 1 la 4) × F(de la 2 la 3). În funcție de poziția relativă a punctelor 1, 2, 3 și 4, avem diferite grade de interferență.

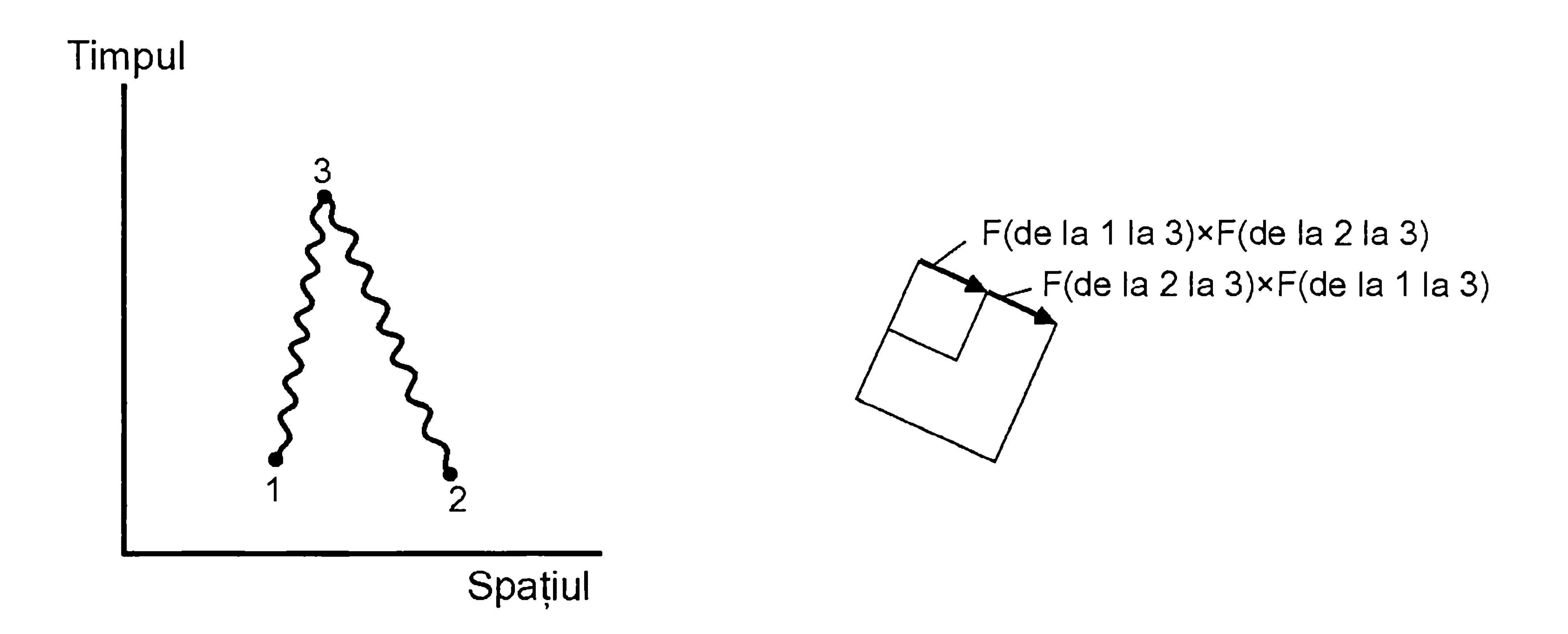


Figura 71. Atunci când punctele 3 și 4 sunt făcute să coincidă, cele două săgeți corespunzătoare - F(de la 1 la 3) × F(de la 2 la 3) și respectiv F(de la 2 la 3) × F(de la 1 la 3) - au lungimi și orientări identice. Atunci când le adunăm, ele se „aliniază" întotdeauna, formând o săgeată cu lungime dublă față de a fiecăreia separat, și un pătrat de patru ori mai mare. Așadar, fotonii tind să se ducă în același punct din spațiutimp. Acest efect este amplificat încă și mai mult atunci când sunt mai mulți fotoni. El constituie baza modului de funcționare a laserului.

Dacă am face acelaşi raţionament asupra electronilor noştri falşi, cu spin 0, am ajunge la aceeaşi concluzie. Însă în lumea reală, în care electronii sunt polarizaţi, se întâmplă ceva total diferit: cele două săgeţi, E(de la 1 la 3) × E(de la 2 la 4) şi respectiv E(de la 1 la 4) × E(de la 2 la 3), se scad - înainte de adunare, una din ele este rotită cu 180°. Atunci când punctele 3 şi 4 coincid, cele două săgeţi au aceeaşi lungime şi direcţie şi, ca atare, prin scădere ele se anulează (a se vedea Figura 72). Aceasta înseamnă că electronilor, spre deosebire de fotoni, nu le place să se ducă în acelaşi loc; ei se feresc unii de alţii ca ciumaţi - doi electroni cu aceeaşi polarizare nu se pot afla în acelaşi punct în spaţiutimp. Acest fapt poartă numele de „Principiul Excluziunii" [cunoscut la noi şi ca Principiul lui Pauli (n.t.)].

Acest principiu al excluziunii se dovedeşte a fi sursa marii varietăţi de proprietăţi chimice ale atomilor. Un proton schimbând fotoni cu un electron care dansează în jurul său, se numeşte atom de hidrogen. Doi protoni aflaţi în acelaşi nucleu, schimbând fotoni cu doi electroni

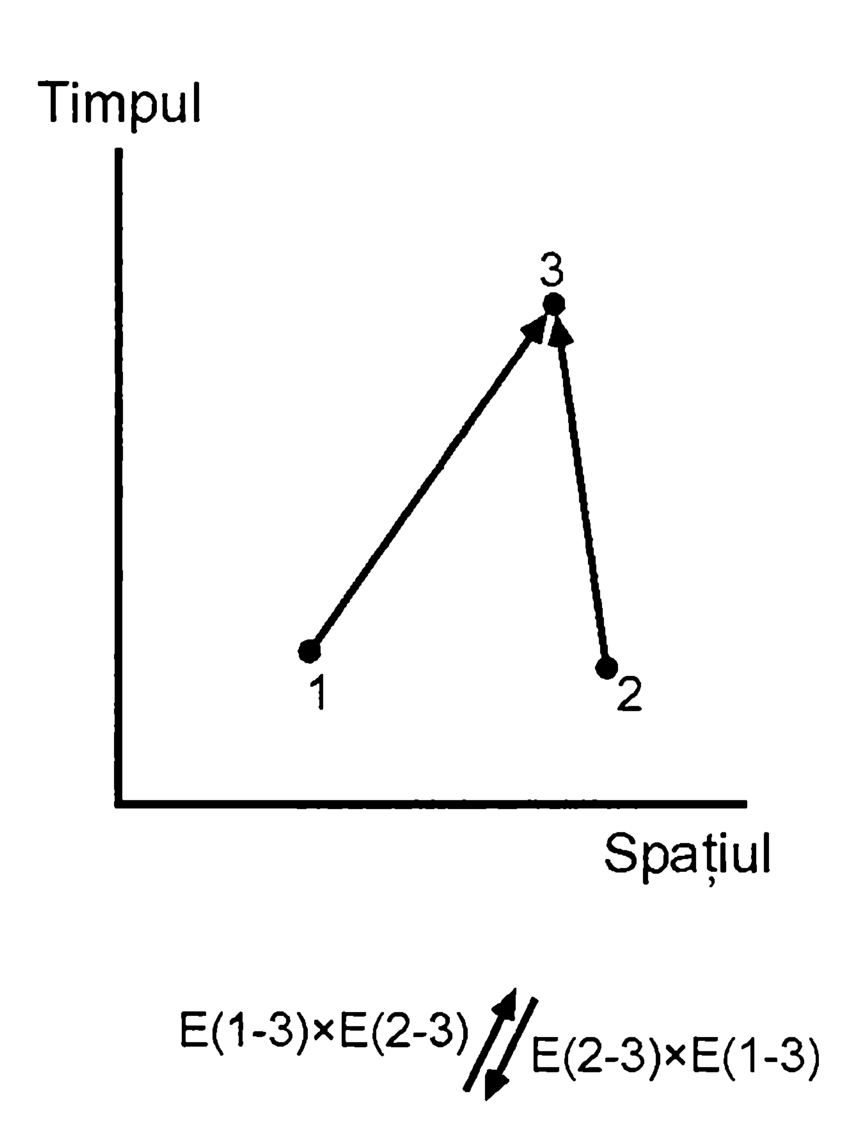


Figura 72. Dacă doi electroni (cu aceeaşi polarizare) încearcă să ajungă în acelaşi punct din spaţiutimp, interferenţa este totdeauna distructivă, din cauza efectelor polarizării: cele două săgeţi identice - E(de la 1 la 3) × E(de la 2 la 3) şi respectiv E(de la 2 la 3) × E(de la 1 la 3) - se scad şi dau o săgeată finală de lungime nulă. Aversiunea a doi electroni de a ocupa acelaşi loc în spaţiutimp se numeşte „Principiul de Excluziune" şi dă socoteală pentru marea varietate de atomi din Univers.

(polarizaţi în sensuri opuse), se chemă atom de heliu. Vedeţi dumneavoastră, chimiştii au un mod al lor complicat de a număra: în loc să spună „unu, doi, trei, patru, cinci protoni“, ei zic „hidrogen, heliu, litiu, beriliu, bor“.

Există doar două stări de polarizare disponibile electronilor, aşa încât, într-un atom cu trei protoni în nucleu schimbând fotoni cu trei electroni - o situaţie numită atom de litiu - al treilea electron este mai depărtat de nucleu decât ceilalţi doi (care au ocupat cel mai apropiat spaţiu disponibil) şi schimbă mai puţini fotoni. Aceasta face ca el să se despartă mai uşor de nucleul său, sub acţiunea fotonilor provenind de la alte nuclee. Un număr uriaş de astfel de atomi apropiaţi unii de alţii, îşi pierd uşor cel de-al treilea electron al lor, formându-se o mare de electroni ce înoată de la un atom la altul. Această mare de electroni reacţionează la orice mică forţă electrică (fotoni), generând un curent de electroni - ceea ce descriu eu acum este litiul metalic conducând curentul electric. Atomii de hidrogen şi heliu nu îşi pierd electronii unii în detrimentul altora. Ei sunt „izolatori“.

Toţi atomii - mai mult de o sută de tipuri diferite - sunt alcătuiţi din câte un anumit număr de protoni ce schimbă fotoni cu un acelaşi număr de electroni. Tiparele în care aceştia din urmă se adună în cadrul atomilor sunt complexe, şi oferă o enormă varietate de proprietăţi: unii atomi sunt metale, alţii sunt izolatori, unii sunt gaze, alţii sunt cristale; există chestii moi şi chestii dure, chestii colorate şi chestii transparente - o revărsare colosală de diversitate şi animaţie, care provine din Principiul Excluziunii şi din repetarea iar şi iar şi iar a celor trei foarte simple acţiuni, F(de la A la B), E(de la A la B) şi *j*. (Dacă electronii din lumea aceasta ar fi nepolarizaţi, toţi atomii ar avea proprietăţi foarte asemănătoare: electronii s-ar îngrămădi toţi laolaltă, aproape de nucleul propriului lor atom, şi cu greu ar fi atraşi de alţi atomi pentru a produce reacţii chimice.)

S-ar putea să vă puneţi întrebarea cum de nişte acţiuni atât de simple pot produce o lume atât de complexă. Este din cauză că fenomenele pe care le vedem în natură sunt rezultatul imensei încâlceli a unui număr nemaipomenit de schimburi de fotoni şi interferenţe. Cunoaşterea celor trei acţiuni fundamentale constituie doar un foarte mic pas către analizarea oricărei situaţii *reale*, în care multitudinea schimburilor de fotoni face imposibil orice calcul - este nevoie să se capete experienţă în privinţa a care dintre posibilităţi sunt mai importante. Şi astfel, inventăm idei precum „indice de refracţie“, ori „compresibilitate“, ori „valenţă“, care să ne ajute să facem calcule de o manieră aproximativă, atunci când la nivel inferior avem de-a face cu o cantitate

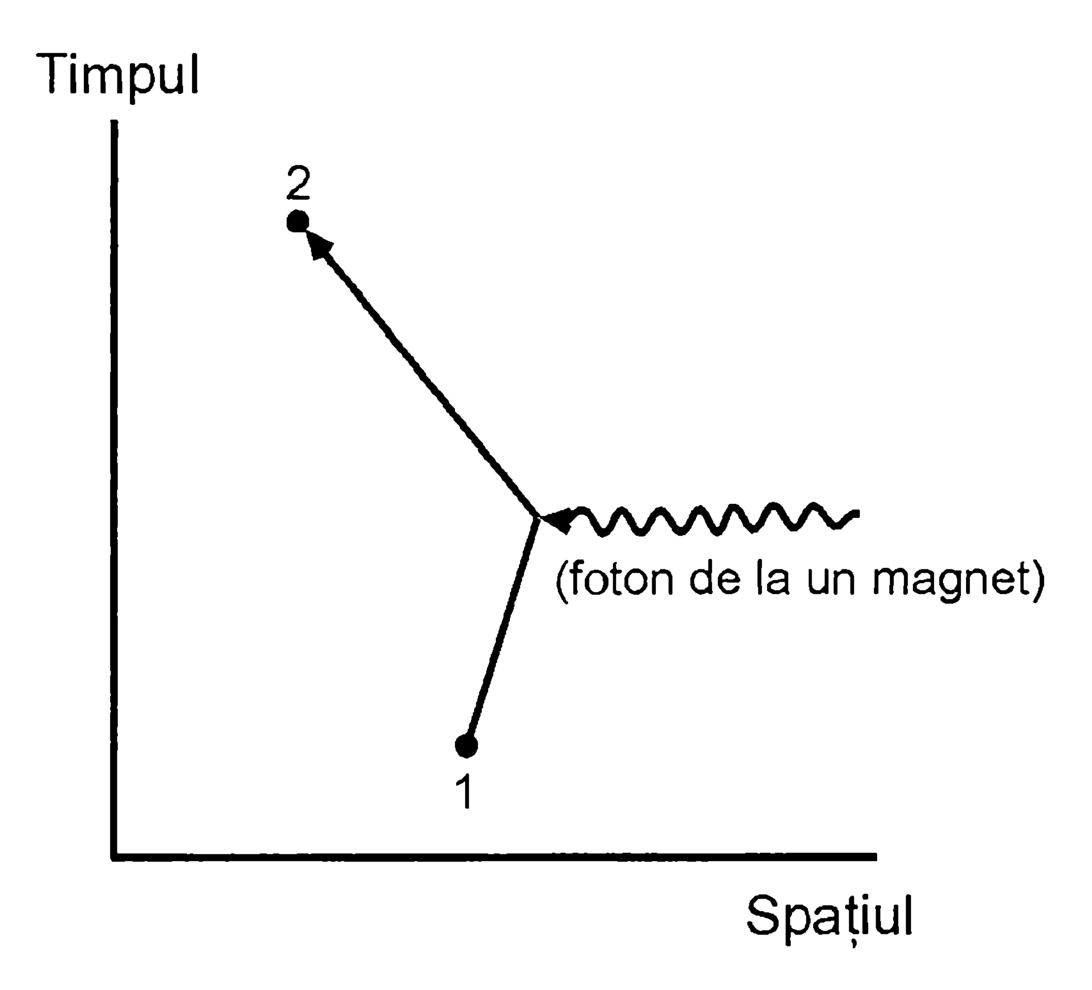


Figura 73. Diagrama folosită de Dirac pentru calcularea momentului magnetic al unui electron este foarte simplă. Valoarea reprezentată de această diagramă va fi numită 1.

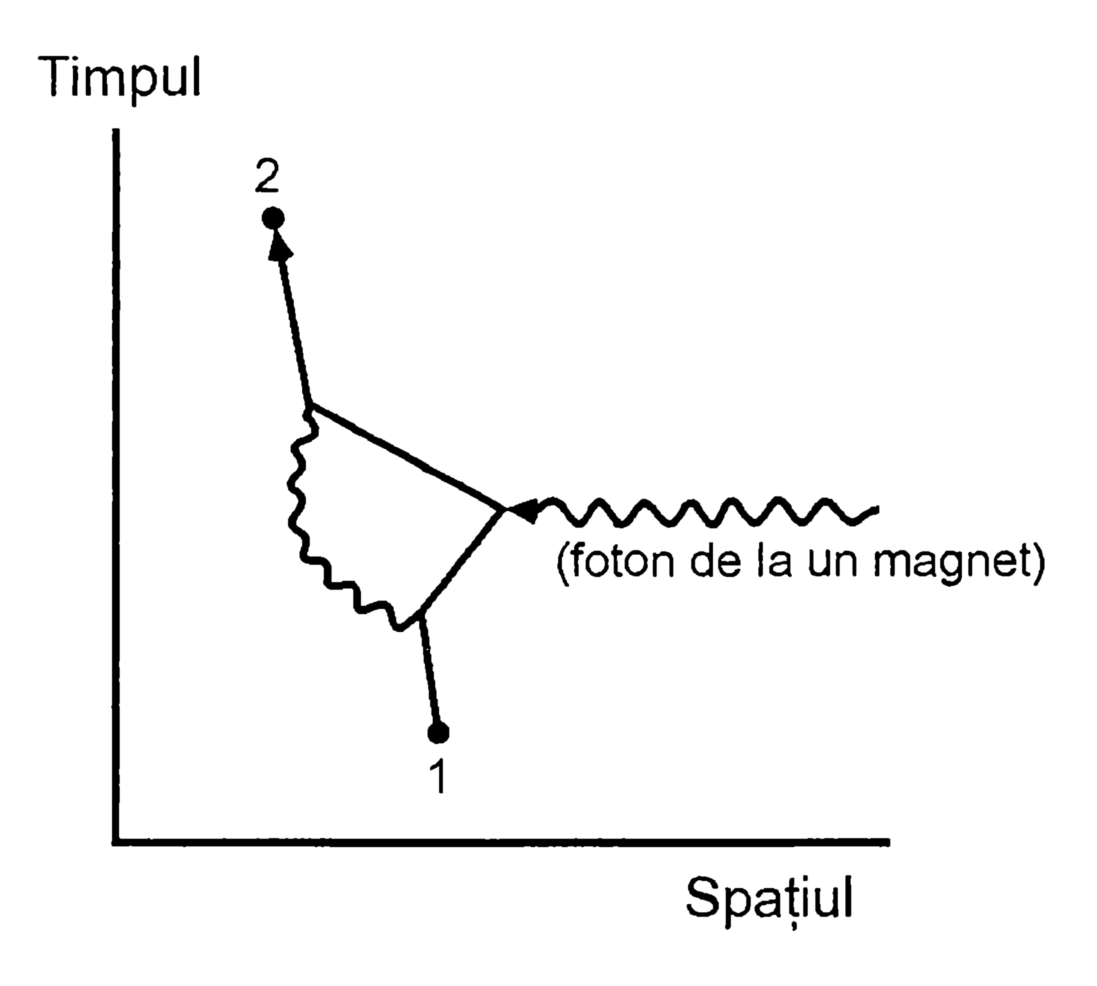


Figura 74. Experimente de laborator relevă faptul că valoarea efectivă a momentului magnetic al unui electron nu este 1, ci un pic mai mare. Aceasta din cauză că el are la dispoziție niște alternative: electronul poate emite un foton și îl poate apoi absorbi – varianta necesitând două E(de la A la B)-uri suplimentare, un F(de la A la B) și două *j*-uri suplimentare. Schwinger a calculat că retușul necesar pentru a ține cont de această alternativă este egal cu $(j \times j)$: (2pi). Cum această variantă nu poate fi deosebită din punct de vedere experimental de maniera originară în care se poate deplasa electronul – el pornește din punctul 1 și sfârșește în punctul 2 – săgețile corespunzătoare trebuie adunate, și apare interferență.

enormă de detalii. Este la fel ca diferenţa între a cunoaşte regulile şahului - care sunt fundamentale şi simple - şi a juca şah bine - care implică înţelegerea caracterului fiecărei poziţii şi natura diverselor situaţii - lucru ce este mult mai dificil şi mai avansat.

Domeniile fizicii care se preocupă de întrebări precum de ce fierul (care are 26 de protoni) este magnetic iar cuprul (cu 29) nu, sau de ce un gaz este transparent şi altul nu, se numesc „fizica stării solide", sau „fizica stării lichide", sau „fizica cinstită". Domeniul fizicii care a descoperit aceste trei mici şi simple acţiuni (partea cea mai complicată) se numeşte „fizica fundamentală" - ne-am arogat această denumire pentru a-i face pe ceilalţi fizicieni să se simtă stânjeniţi! În ziua de astăzi, cele mai interesante probleme şi, în mod cert, cele mai practice, se găsesc, fără doar şi poate, în cadrul fizicii stării solide. Însă cineva a spus cândva că nimic nu este mai practic decât o teorie bine pusă la punct; iar teoria electrodinamicii cuantice este, în mod categoric, o teorie bine pusă la punct.

În fine, aş dori să revin la numărul 1,00115963221, numărul despre care v-am spus în prima prelegere că a fost măsurat şi calculat cu atâta exactitate. Acest număr reprezintă reacţia unui electron la aplicarea din exterior a unui câmp magnetic - ceva ce se numeşte „moment magnetic". Atunci când Dirac a dedus prima dată regulile de calcul pentru acest număr, el a folosit formula pentru E(de la A la B) şi a obţinut un rezultat foarte simplu, pe care în unităţile noastre îl vom considera drept 1. Diagrama corespunzătoare acestei prime aproximări pentru momentul magnetic al unui electron este foarte simplă - electronul se deplasează dintr-un loc în altul în spaţiutimp şi se cuplează cu un foton de la un magnet (a se vedea Figura 73).

După câţiva ani, s-a descoperit că această valoare nu era exact 1, ci un pic mai mare - ceva în jurul a 1,00116. Această corecţie a fost dedusă prima dată în 1948, de către Schwinger, ca fiind egală cu $j \times j$ împărţit la 2 pi, şi se datorează unei maniere alternative în care electronul se poate deplasa dintr-un loc în altul: în loc să meargă direct dintr-un punct în celălalt, electronul se deplasează o vreme, şi brusc emite un foton; apoi (oroare!) el îşi absoarbe propriul foton (a se vedea Figura 74). Poate că este ceva „imoral" în asta, dar asta face electronul! Pentru a calcula săgeata corespunzătoare acestei alternative, trebuie să construim câte o săgeată pentru fiecare punct din spaţiutimp în care ar putea fi emis fotonul şi pentru fiecare punct în care el ar putea fi absorbit. Astfel, vom avea două E(de la A la B)-uri suplimentare, un F(de la A la B) şi două *j*-uri suplimentare, toate înmulţite între ele.

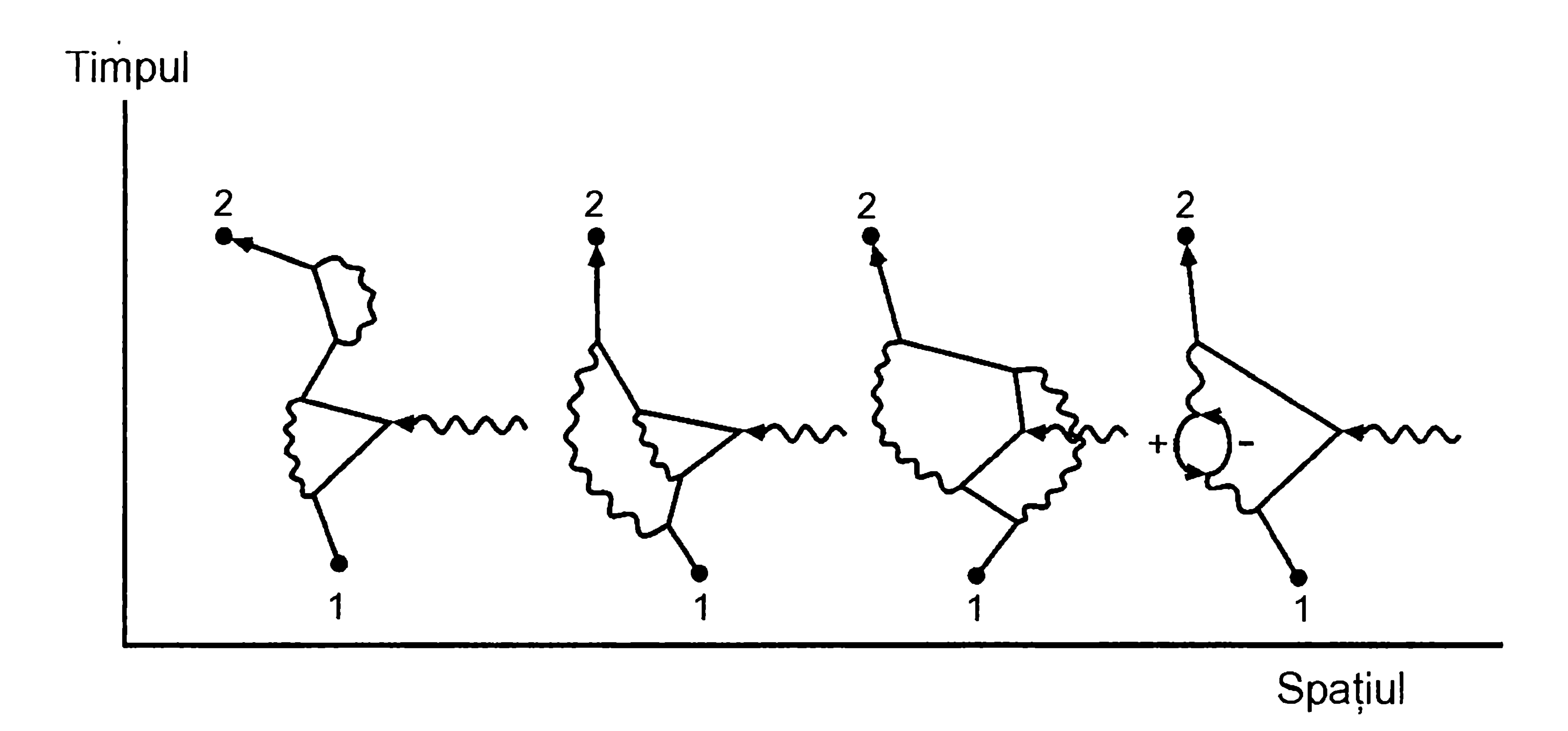


Figura 75. Experimentele de laborator au devenit atât de exacte, încât a trebuit calculate alte noi alternative, implicând patru cuplări suplimentare (pe toate punctele intermediare posibile din spațiutimp). Unele dintre acestea sunt reprezentate în desenul de față. Alternativa din partea dreaptă a desenului implică dezintegrarea unui foton într-o pereche pozitron-electron (așa cum s-a arătat în Figura 64), care la rândul lor se anihilează spre a forma un nou foton, absorbit în ultimă instanță de către electron.

Studenții învață cum să facă acest calcul simplu în cadrul cursului lor elementar de electrodinamică cuantică, în anul doi de doctorat.

Dar ia stați așa; în cadrul experimentelor, comportarea unui electron a fost măsurată cu o asemenea precizie, încât trebuie să luăm în considerare și alte posibilități de calcul: toate modurile în care s-ar putea deplasa electronul dintr-un loc în altul cu *patru* cuplări suplimentare (a se vedea Figura 75). Există trei feluri în care electronul poate emite și absorbi doi foton. Mai există, de asemenea, și o posibilitate nouă, interesantă (prezentată în partea din dreapta a Figurii 75): se emite un foton, el produce o pereche pozitron-electron, și - încă o dată, dacă vă înfrânați obiecțiile „morale" - cei doi se anihilează, creând un nou foton, ce este în cele din urmă absorbit de electron. Această posibilitate trebuie și ea avută în vedere!

Două grupuri „independente" de fizicieni au avut nevoie de doi ani pentru a calcula acest nou termen, și de încă un an după aceea pentru a realiza că undeva se strecurase o greșeală - experimentatorii

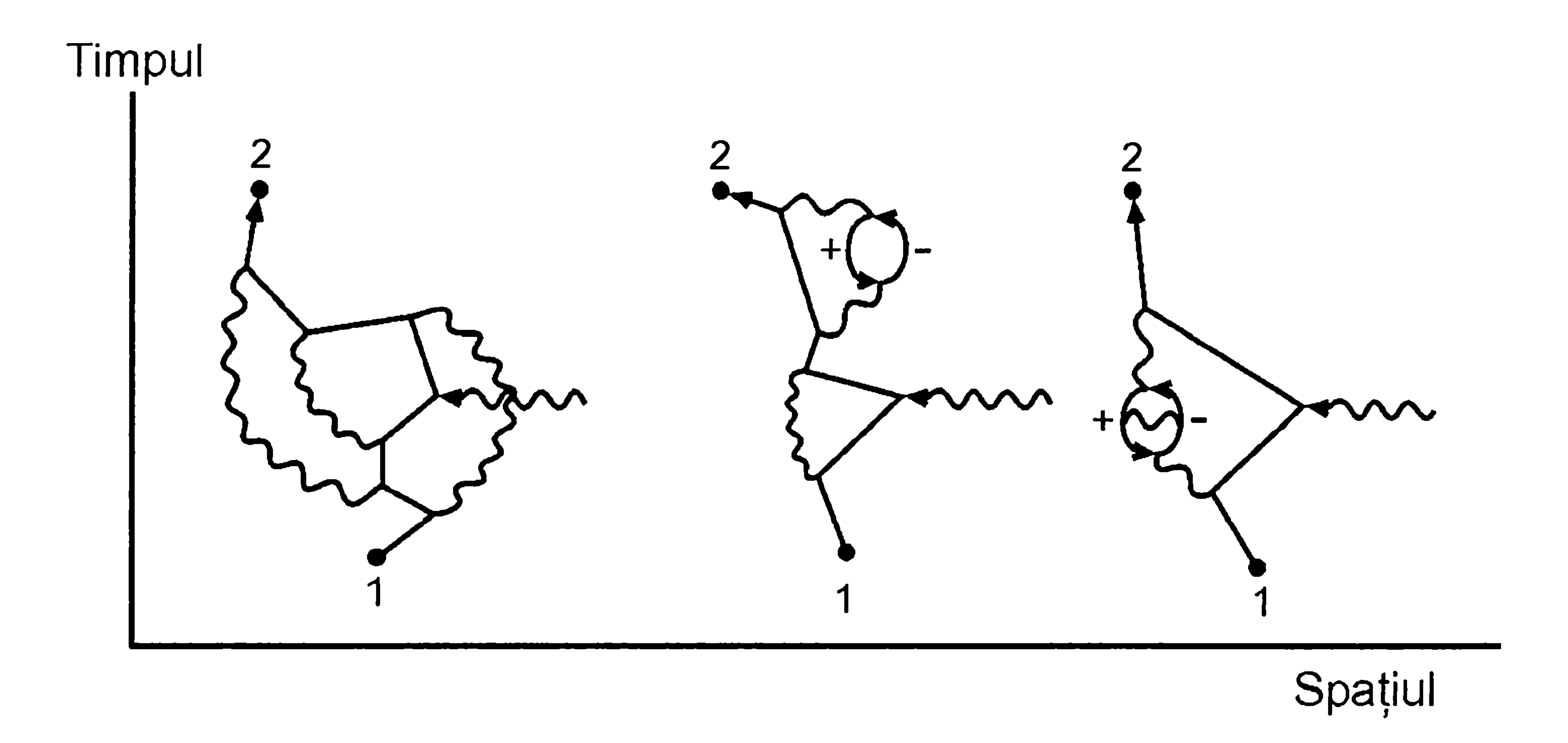


Figura 76. În clipa de faţă se fac în continuare calcule pentru a produce o valoare teoretică încă şi mai exactă. Următoarea contribuţie la amplitudinea evenimentului o constituie toate variantele implicând şase cuplări suplimentare – este vorba de ceva în jur de 70 de diagrame, dintre care trei sunt reprezentate în desenul de faţă. Din anul 1983, valoarea teoretică a devenit 1,00115965246, cu o marjă de eroare de circa 20 pentru ultimele două zecimale; numărul experimental este 1,00115965221, cu o marjă de aproximativ 4 pentru ultima cifră. Această precizie este echivalentă cu a măsura distanţa de la Los Angeles la New York, o distanţă de peste 5000 de kilometri, cu o exactitate de un fir de păr.

determinaseră o valoare uşor diferită, şi pentru o scurtă vreme a părut că era prima dată când teoria nu concorda cu experimentul. Dar nu: era o greşeală de calcul. Cum fusese posibil ca două grupuri să facă aceeaşi greşeală? S-a dovedit că aproape de terminarea calculelor, cele două grupuri şi-au comparat notiţele între ele şi au aplanat diferenţele existente în calculele lor, deci ele nu fuseseră cu adevărat independente.

Termenul cu *şase j*-uri suplimentare implică încă şi mai multe modalităţi în care s-ar putea petrece evenimentul, şi vă voi desena câteva dintre ele (a se vedea Figura 76). A fost nevoie de douăzeci de ani pentru a introduce această precizie suplimentară în valoarea teoretică a momentului magnetic al unui electron. Între timp, experimentatorii au efectuat determinări încă şi mai detaliate, şi au adăugat numărului lor încă alte câteva zecimale – iar teoria continuă să vină în concordanţă cu acesta. Aşadar, pentru a efectua calculele, noi realizăm aceste diagrame, notăm lucrurile cărora ele le corespund din punct de

vedere matematic, şi adunăm nişte amplitudini - o procedură directă, ca dintr-o „carte de bucate". Ca atare, ea poate fi efectuată de maşini. Acum, că dispunem de calculatoare supermeseriaşe, ne-am apucat să calculăm termenul cu opt *j*-uri suplimentare. La ora actuală, numărul teoretic este egal cu 1,00115965246; experimental, el are valoarea 1,00115965221, plus sau minus 4 la ultima cifră zecimală. O parte din imprecizia valorii teoretice (aproximativ 4 pentru ultima cifră zecimală) se datorează rotunjirilor pe care le face calculatorul; marea parte a ei (circa 20) se datorează faptului că nu se cunoaşte cu exactitate valoarea lui *j*. Termenul corespunzător la opt *j*-uri suplimentare implică ceva de ordinul a nouă sute de diagrame, fiecare cu câte o sută de mii de termeni - un calcul nemaipomenit - şi valoarea lui este calculată chiar în timp ce eu vă vorbesc.

Sunt convins că peste alţi câţiva ani, valorile teoretică şi experimentală ale momentului magnetic al unui electron vor fi determinate cu încă şi mai multe zecimale. Desigur, nu sunt sigur dacă cele două vor continua să concorde. Asta nu se poate spune până când nu faci calculele şi experimentele.

Şi astfel, am ajuns înapoi la numărul cu care am ales să vă „intimidez" la începutul acestor prelegeri. Sper că acum înţelegeţi mult mai bine semnificaţia acestui număr: el reprezintă gradul extraordinar de precizie cu care am verificat în mod constant faptul că strania teorie a electrodinamicii cuantice este într-adevăr corectă.

Pe parcursul acestor prelegeri, am simţit o reală încântare să vă arăt că preţul plătit pentru atingerea unei asemenea precizii teoretice, a fost erodarea bunului-simţ. Trebuie să acceptăm anumite comportări foarte bizare: amplificarea şi atenuarea probabilităţilor, reflexia luminii pe toate zonele unei oglinzi, propagarea luminii pe traiectorii altele decât liniile drepte, fotoni deplasându-se cu viteze mai mari ori mai mici decât viteza convenţională a luminii, electroni mergând înapoi în timp, fotoni dezintegrându-se brusc într-o pereche pozitron-electron, şi aşa mai departe. Asta trebuie să facem pentru a putea aprecia ceea ce trebăluieşte Natura îndărătul marii majorităţi a fenomenelor pe care le observăm în această lume.

Cu excepţia detaliilor tehnice legate de polarizare, v-am descris întregul cadru conceptual în care înţelegem noi toate aceste fenomene. Desenăm *amplitudini* pentru fiecare modalitate în care se poate petrece un eveniment şi, acolo unde, în circumstanţe obişnuite, ne-am fi aşteptat să adunăm probabilităţile, adunăm amplitudinile; iar acolo

unde ne-am fi așteptat să înmulțim probabilități, înmulțim amplitudini. La început, a gândi totul în termeni de amplitudini s-ar putea să creeze dificultăți, din cauza caracterului lor abstract; dar, după un timp, lumea se obișnuiește cu acest limbaj ciudat. În spatele atât de multor fenomene pe care le vedem zi de zi, se ascund numai trei acțiuni de bază: una este descrisă de către banalul număr de cuplare, *j*; celelalte două, de către funcțiile F(de la A la B) și E(de la A la B), strâns înrudite între ele. Asta-i tot, și din acestea provin toate celelalte legi ale fizicii.

Totuși, înainte de a încheia această prelegere, aș dori să mai fac câteva remarci. Spiritul și caracterul electrodinamicii cuantice pot fi înțelese și fără a introduce acest detaliu tehnic legat de polarizare. Însă sunt sigur că v-ați simți cu toții neplăcut dacă n-aș spune câteva cuvinte despre chestiunea pe care am omis-o. Se dovedește că fotonii ne parvin în patru varietăți, numite polarizări. Acestea au o legătură de natură geometrică cu direcțiile spațiului și timpului. Astfel, există fotoni polarizați pe direcțiile X, Y, Z și T. (Poate veți fi auzit pe undeva că lumina ne parvine în doar două stări de polarizare - de exemplu, un foton ce se deplasează de-a lungul axei Z poate fi polarizat perpendicular, fie pe direcția axei X, fie pe Y. Ei bine, ați ghicit: în situații în care fotonul se deplasează pe o distanță lungă, și ne apare a se deplasa cu viteza luminii, amplitudinile corespunzătoare termenilor pentru Z și T se anulează reciproc. Însă pentru fotonii virtuali care se deplasează de la un proton la un electron în cadrul unui atom, cea care contează cel mai mult este componenta T.)

De o manieră asemănătoare, un electron se poate afla în una dintr-un număr de patru condiții, legate și ele de geometrie, dar într-un mod mai subtil. Am putea numi aceste condiții 1, 2, 3 și 4. Calcularea amplitudinii ca un electron să se deplaseze din punctul A în punctul B în spațiutimp, devine oarecum mai complicată, căci ne-am putea acum pune întrebări precum: „Care este amplitudinea ca un electron eliberat în punctul A în condiția 2, să ajungă în punctul B în condiția 3?“ Cele șaisprezece combinații posibile - provenind din cele patru condiții distincte în care electronul poate porni din A și cele patru condiții distincte în care el poate ajunge în B - sunt legate într-o manieră simplă din punct de vedere matematic de formula E(de la A la B), despre care v-am vorbit.

Pentru un foton, nu este necesară o asemenea modificare. Astfel, un foton care în A este polarizat pe direcția lui X, va continua să fie polarizat pe direcția lui X și când ajunge în B, amplitudinea fiind dată de F(de la A la B).

Polarizarea produce un număr mare de cuplări distincte posibile. De exemplu, ne-am putea întreba: „Care este amplitudinea ca un electron aflat în condiția 2 să absoarbă un foton polarizat pe direcția lui X și, ca rezultat, să se transforme într-un electron în condiția 3?“ Nu chiar toate combinațiile posibile de electroni și fotoni polarizați se pot cupla, însă cele care o fac, o fac cu aceeași amplitudine *j* și, uneori, cu o rotire suplimentară a săgeții cu un multiplu oarecare de 90°.

Aceste posibilități pentru diferitele tipuri de polarizări și pentru natura cuplării, pot fi deduse toate, într-o manieră foarte elegantă și frumoasă, din principiile electrodinamicii cuantice și din două presupuneri suplimentare: 1) rezultatele unui experiment nu sunt afectate de rotirea pe o altă direcție a aparatului cu care se face experimentul; 2) de asemenea, nu contează dacă aparatul se află într-o navă spațială care se deplasează cu o viteză constantă oarecare. (Aceasta din urmă reprezintă Principiul Relativității.)

Această analiză elegantă și generală ne arată că fiecare particulă trebuie să se afle într-o clasă sau alta de polarizări posibile, pe care le vom numi spin 0, spin 1/2, spin 1, spin 3/2, spin 2 și așa mai departe. Diversele clase se comportă în moduri diferite. O particulă cu spin 0 este cea mai simplă - ea are doar o componentă, și practic nu este polarizată deloc. (Electronii falși și fotonii pe care i-am luat în considerare în această prelegere sunt particule cu spin 0. Până acum, nu s-au descoperit particule fundamentale cu spin 0.) Un electron real reprezintă un exemplu de particulă cu spin 1/2, iar un foton real este un exemplu de particulă cu spin 1. Atât particulele cu spin 1/2 cât și cele cu spin 1, au patru componente. Celelalte tipuri ar trebui să aibă mai multe componente, cum ar fi, de pildă, particulele cu spin 2, cu zece componente.

Am afirmat că legătura între relativitate și polarizare este simplă și elegantă, dar nu sunt sigur că v-o pot explica de o manieră simplă și elegantă! (Mi-ar trebui cel puțin o prelegere în plus pentru a o face.) Deși detaliile legate de polarizare nu sunt esențiale pentru înțelegerea spiritului și caracterului electrodinamicii cuantice, ele sunt, desigur, esențiale pentru calcularea corectă a oricărui proces real, și adesea au efecte profunde.

În aceste prelegeri, ne-am concentrat asupra interacțiunilor relativ simple ale electronilor și protonilor la distanțe mici, în care sunt implicate doar puține particule. Dar aș dori să fac o remarcă sau două în legătură cu modul în care aceste interacțiuni apar la scară mai largă,

la care se schimbă numere foarte, foarte mari de fotoni. La o asemenea scară, calcularea săgeţilor devine foarte complicată.

Există, totuşi, unele situaţii care nu sunt chiar atât de greu de analizat. De pildă, există circumstanţe în care amplitudinea de emitere a unui foton de către o sursă este independentă de emiterea sau nu a vreunui alt foton. Aceasta se poate întâmpla atunci când sursa este foarte grea (nucleul unui atom) sau atunci când un număr foarte mare de electroni se mişcă toţi în acelaşi fel, ca în cazul în care urcă şi coboară prin antena unei staţii de emisie, ori se rotesc prin înfăşurările unui electromagnet. În astfel de situaţii se emit un număr mare de fotoni, toţi de acelaşi fel. Într-un asemenea mediu, amplitudinea ca un electron să absoarbă un foton este independentă de faptul dacă el, sau orice alt electron, a absorbit sau nu vreun alt foton mai devreme. Ca atare, întreaga sa comportare poate fi dată prin intermediul doar a acestei amplitudini, ca el să absoarbă un foton, amplitudine ce depinde numai de poziţia electronului în spaţiu şi timp. Pentru a descrie astfel de circumstanţe, fizicienii folosesc cuvinte din vorbirea obişnuită. Ei spun că electronul se mişcă într-un câmp extern.

Fizicienii folosesc cuvântul „câmp" pentru a descrie o mărime ale cărei valori depind de situarea în spaţiu şi timp. Temperatura atmosferică oferă un bun exemplu: ea variază în funcţie de locul şi momentul în care efectuăm măsurarea. Atunci când luăm în discuţie polarizarea, câmpul prezintă mai multe componente. (Există patru componente, corespunzând amplitudinilor de absorbire a unui foton în fiecare din stările de polarizare - X, Y, Z, T - în care el s-ar putea afla, numite în limbaj tehnic potenţial electromagnetic vectorial şi potenţial electromagnetic scalar. Din combinarea acestora, în fizica clasică se obţin nişte componente mai convenabile, numite câmp electric şi câmp magnetic.)

În situaţia în care câmpurile electric şi magnetic variază suficient de lent, amplitudinea ca un electron să străbată o distanţă mare depinde de drumul pe care o ia. Aşa cum am văzut mai înainte în cazul luminii, drumurile cele mai importante sunt cele pentru care unghiurile amplitudinilor corespunzătoare unor traiectorii învecinate sunt aproape aceleaşi. Rezultatul este că particula nu se deplasează neapărat în linie dreaptă.

Cu aceasta, am ajuns înapoi drept până la fizica clasică, în cadrul căreia se presupune că există câmpuri şi că electronii se mişcă prin acestea în aşa fel încât o anumită mărime să ia valoare cât mai mică. (Fizicienii numesc această mărime fizică „acţiune", şi enunţă această regulă sub titulatura de „Principiul Minimei Acţiuni".) Acesta reprezintă un exemplu de manieră în care regulile electrodinamicii cuantice

produc fenomene la scară mare. Ajunşi în acest punct, am putea extinde discuţia în multe direcţii, dar trebuie să ne limităm la scopul acestor prelegeri. Am dorit doar să vă reamintesc faptul că efectele pe care le vedem la scară mare sunt produse tot de interacţiunile electronilor cu fotonii, şi că, în ultimă instanţă, sunt toate descrise de teoria electrodinamicii cuantice.



FINAL DESCHIS

Voi împărți această prelegere în două părți. Mai întâi, voi vorbi despre unele chestiuni legate de însăşi teoria electrodinamicii cuantice, presupunând că tot ce există în lume nu sunt decât electroni şi fotoni. Apoi, voi vorbi despre relația electrodinamicii cuantice cu restul fizicii.

Cea mai şocantă caracteristică a teoriei electrodinamicii cuantice o reprezintă cadrul conceptual al amplitudinilor, care v-ar putea face să credeți că este semnul existenței unor necazuri de natură oarecare! Totuşi, sunt mai bine de cincizeci de ani de când fizicienii îşi fac de lucru cu aceste amplitudini, şi s-au obişnuit foarte mult cu ele. Mai mult, toate noile particule şi noile fenomene pe care le putem observa, se încadrează perfect în tot ceea ce se poate demonstra pornind de la un asemenea cadru conceptual, în care probabilitatea unui eveniment este egală cu pătratul unei săgeți finale, obținute prin compunerea unor săgeți în tot felul de moduri (cu interferență, şi celelalte). Deci, acest cadru conceptual *nu admite niciun dubiu din punct de vedere experimental*: puteți avea oricâte îndoieli filosofice doriți în legătură cu semnificația pe care o au amplitudinile (dacă au, într-adevăr, vreuna), dar, din cauza faptului că fizica este o ştiință experimentală, iar cadrul conceptual concordă cu experimentul, el este până acum valabil.

Există o serie de probleme asociate cu teoria electrodinamicii cuantice, privitoare la îmbunătățirea metodei de calcul pentru suma tuturor acelor mici săgeți – diverse tehnici, abordabile în diferite situații – care îi iau unui doctorand trei-patru ani până să le stăpânească. Cum ele constituie probleme tehnice, nu le voi discuta aici. Este doar o chestiune de a îmbunătăți în mod constant tehnicile de analizare a ceea ce afirmă teoria în diverse circumstanțe.

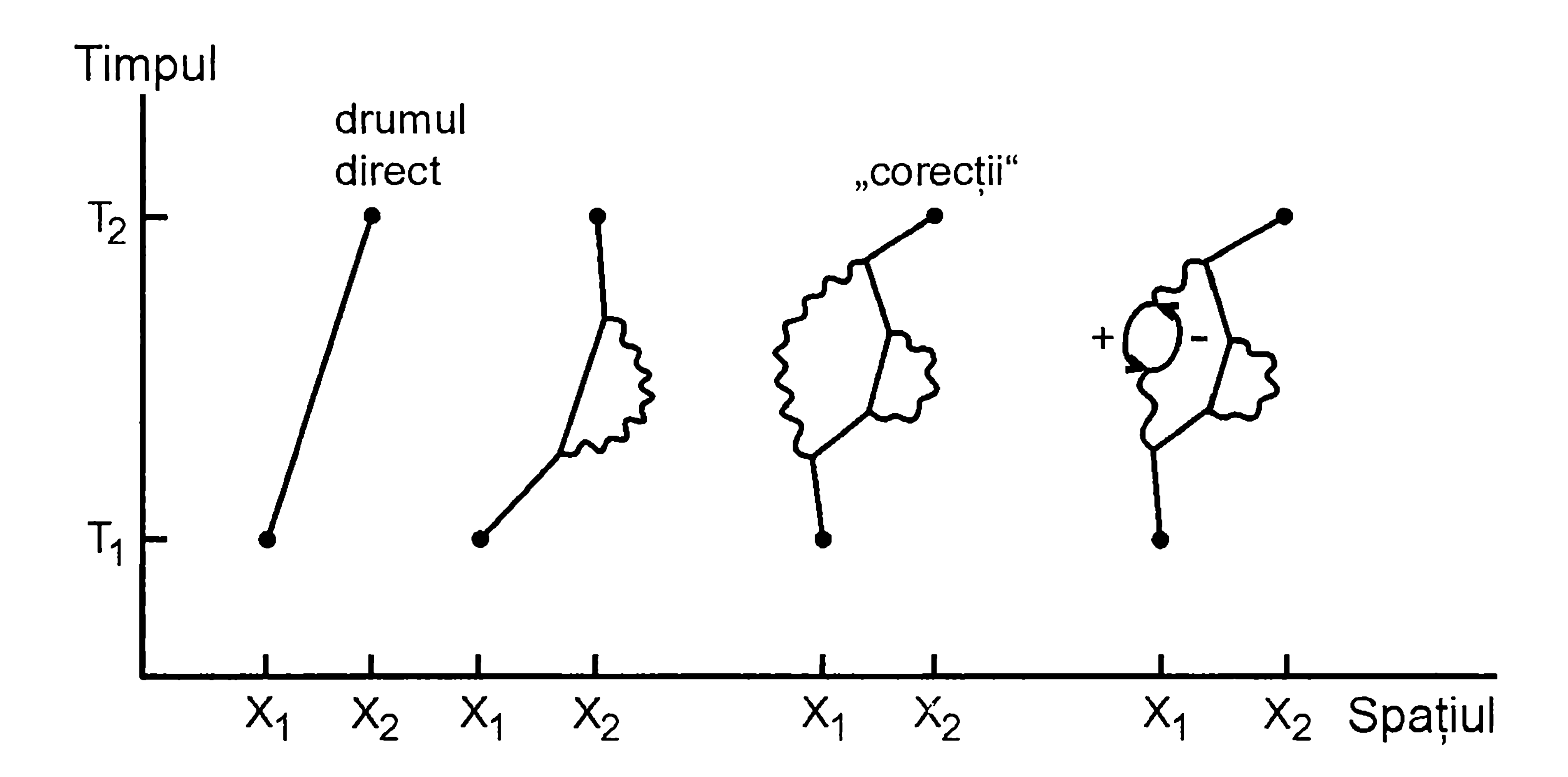


Figura 77. Atunci când calculăm amplitudinea ca un electron să se deplaseze dintr-un punct în altul în spațiutimp, pentru drumul direct folosim formula E(de la A la B). (Apoi facem nişte „corecții", care includ emiterea sau absorbția unuia sau mai multor fotoni.) E(de la A la B) depinde de $(X_2 - X_1)$, $(T_2 - T_1)$ şi *n*, un număr pe care îl introducem în formulă ca să ne iasă corect rezultatul. Acest număr se numeşte „masă de repaus" a unui electron „ideal", şi nu poate fi determinat experimental, deoarece masa de repaus a unui electron real, *m*, include toate acele corecții. Există o anumită dificultate în calcularea valorii lui *n* care să fie folosită în expresia lui E(de la A la B), a cărei surmontare a luat douăzeci de ani.

Dar există o problemă în plus, caracteristică teoriei electrodinamicii cuantice înseşi, a cărei surmontare a necesitat douăzeci de ani. Ea are legătură cu electronii şi fotonii ideali şi cu numerele *n* şi *j*.

Dacă electronii ar fi ideali, şi dacă s-ar deplasa dintr-un punct în altul în spațiutimp *numai* pe drumul direct (reprezentat în Figura 77 în partea din stânga a desenului), atunci n-ar fi nicio problemă: *n* ar fi pur şi simplu masa unui electron (pe care o putem determina practic), iar *j* ar fi pur şi simplu „sarcina" acestuia (amplitudinea ca electronul să se cupleze cu un foton). Şi şi aceasta poate fi determinată experimental.

Dar nu există astfel de electroni ideali. Masa pe care o observăm în laborator este cea a unui electron *real*, care, din când în când, emite şi absoarbe propriii săi fotoni, şi, ca atare, ea depinde de amplitudinea

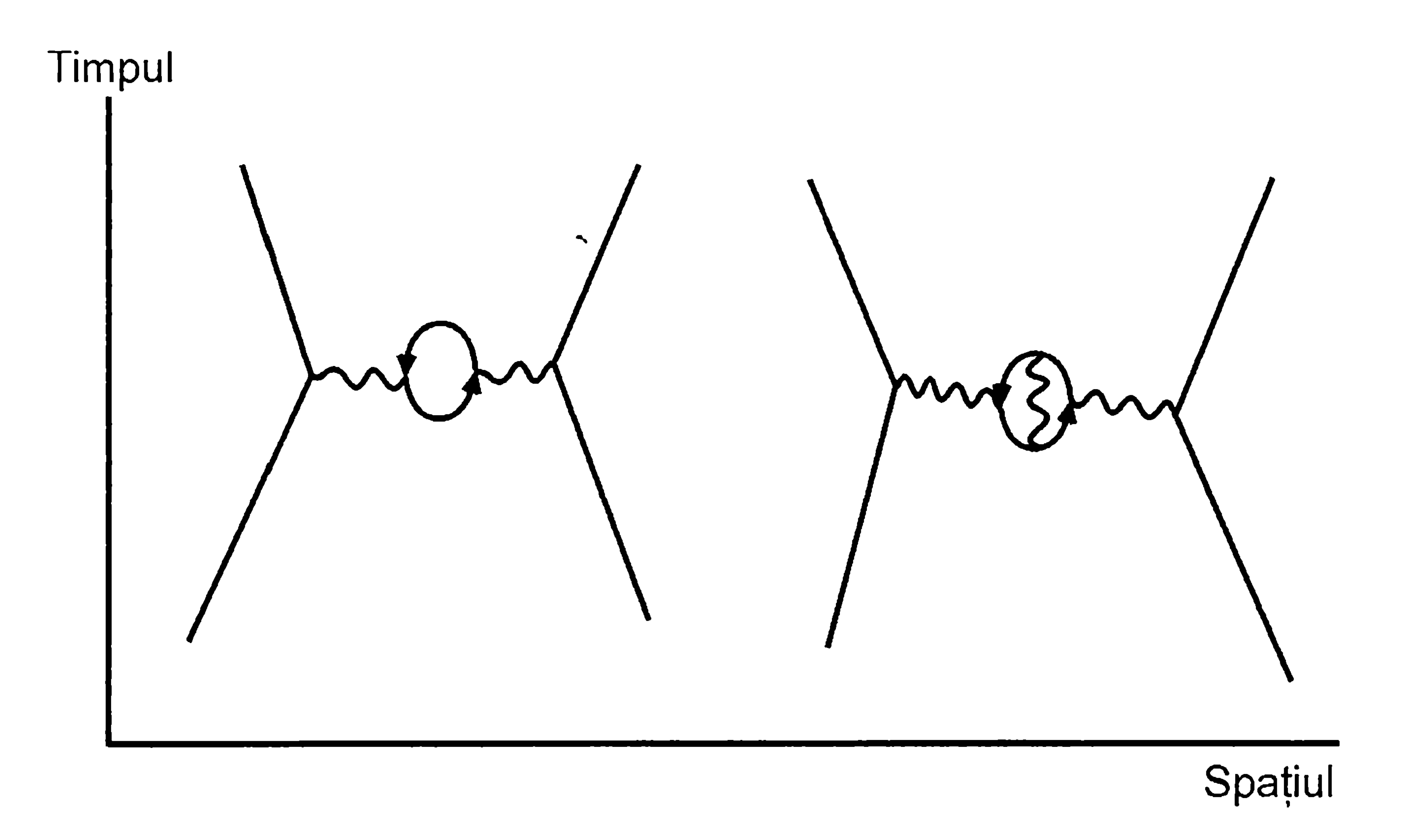


Figura 78. Valoarea măsurată experimental a amplitudinii ca un electron să se cupleze cu un foton, un misterios număr *e*, este o valoare ce include toate „corecțiile" referitoare la deplasarea unui foton dintr-un punct în altul în spațiutimp. Două dintre acestea sunt reprezentate în desenul de față. În calcule, noi avem nevoie de un număr *j*, care să nu includă aceste corecții, ci doar deplasarea fotonului direct dintr-un punct în altul. Determinarea acestui *j* se lovește de o dificultate asemănătoare cu cea întâmpinată la determinarea valorii lui *n*.

de cuplare *j*. Iar sarcina pe care o observăm în laborator este cea dintre un electron *real* și un foton *real* - care, din când în când, poate forma o pereche pozitron-electron - și, ca atare, ea depinde de E(de la A la B), ceea ce îl implică pe *n* (a se vedea Figura 78). Cum masa și sarcina unui electron sunt afectate de aceste - și de toate celelalte - alternative, masa *m* măsurată experimental și sarcina *e* măsurată experimental ale electronului, diferă de numerele *n* și *j* pe care le folosim în calculele noastre.

Dacă ar exista o legătură matematică bine determinată între *n* și *j* pe de o parte, și *m* și *e* pe de cealaltă parte, n-ar fi nicio problemă: pur și simplu, am calcula valorile lui *n* și *j* de la care trebuie să pornim pentru a obține valorile experimentale *m* și *e*. (Dacă rezultatele nu s-ar potrivi cu *m* și *e*, am învârti valorile inițiale ale lui *n* și *j* până când ar face-o.)

Haideți să vedem cum se calculează efectiv *m*-ul. Scriem o serie de termeni care arată cam ca cea pe care am întâlnit-o la momentul magnetic al unui electron. Primul termen nu conține cuplări - doar E(de la A la B) - şi reprezintă deplasarea unui electron ideal direct dintr-un punct în altul în spațiutimp. Al doilea termen are două cuplări şi reprezintă emiterea şi absorbția unui foton. Urmează apoi termenii cu patru, şase, opt cuplări, şi aşa mai departe (câteva din aceste corecții sunt prezentate în Figura 77).

Atunci când se calculează termenii implicând cuplări, trebuie luate în considerare (ca întotdeauna) toate punctele în care se pot produce acestea, mergând până la cazurile în care două puncte de cuplare se suprapun - distanța între ele este egală cu zero. Problema este că, atunci când încercăm să ducem calculele până la valori ale distanțelor tinzând spre zero, ecuațiile ne explodează în față şi ne rezultă lucruri lipsite de sens... cum ar fi infiniții. Acest lucru a creat o grămadă de necazuri la început, când a apărut teoria electrodinamicii cuantice. Orice încercam să calculăm, obțineam infinit! (Pentru a fi consistenți din punct de vedere matematic, trebuia să putem merge cu calculele până la distanțe tinzând spre zero, dar tocmai acolo nu găseam niciun *n* sau *j* care să aibă vreun sens; exact acolo era buba.)

Ei bine, dacă în loc să includem toate punctele de cuplare posibile, până la cele între care distanța tinde la zero, ne *oprim* cu calculul la valori foarte mici ale distanței - să zicem, 10^{-30} centimetri, care este de miliarde şi miliarde de ori mai mică decât orice lucru observabil experimental (actualmente, de ordinul a 10^{-16} centimetri) - obținem pentru *n* şi *j* nişte valori bine precizate, ce pot fi utilizate pentru ca masa şi sarcina rezultate din calcule să se potrivească cu *m*-ul şi *e*-ul determinate experimental. Acuma, iată care-i baiul: dacă ne oprim cu calculul la o altă valoare a distanței - să zicem 10^{-40} centimetri - valorile lui *n* şi *j* necesare pentru a obține aceleaşi *m* şi *e* sunt *altele*!

Douăzeci de ani mai târziu, în 1949, Hans Bethe şi Victor Weisskopf au sesizat un lucru: ei au observat că, pornind de la aceleaşi valori ale lui *m* şi *e* şi determinând pe *n* şi *j* de două ori, prin două calcule care să se oprească la valori diferite ale distanțelor, dacă se ia după aceea o *altă* problemă oarecare, şi se fac calculele de două ori, cu valorile diferite găsite pentru *n* şi *j*, rezultatele compunerii săgeților corespunzătoare includerii tuturor termenilor, sunt aproape egale! În fapt, cu cât cele două calcule se opresc mai aproape de distanța nulă, cu atât cele două *n*-uri şi *j*-uri dau rezultate mai apropiate pentru acea altă problemă! Pentru a confirma faptul că acest lucru este adevărat, Schwinger, Tomonaga şi subsemnatul am pus la punct în mod independent nişte

metode prin intermediul cărora să se poată face calcule concrete (am luat şi premii pentru asta). Lumea putea aplica, în sfârşit, teoria electrodinamicii cuantice!

Aşadar, se vădeşte că *singurele* lucruri care depind de distanțele mici dintre punctele de cuplare sunt valorile lui *n* şi *j*... *numere teoretice, care oricum nu sunt observabile în mod direct*; orice altceva care *poate* fi observat, pare a nu fi afectat.

Jocul de alba-neagra pe care îl jucăm pentru a găsi valorile lui *n* şi *j* poartă numele tehnic de „renormare". Dar, indiferent cât de elevat ar fi cuvântul, el reprezintă ceea ce eu aş numi o procedură fără noimă. Faptul de a apela la astfel de scamatorii ne-a împiedicat să demonstrăm că teoria electrodinamicii cuantice este consistentă în sine din punct de vedere matematic. Este de mirare că până la ora actuală nu s-a demonstrat în vreun fel sau altul self-consistența ei; eu suspectez că renormalizarea nu se legitimează din punct de vedere matematic. Ceea ce este sigur, este faptul că nu dispunem de o modalitate matematică valabilă de a descrie teoria electrodinamicii cuantice: o asemenea înşiruire de cuvinte prin care descriem legătura între *n* şi *j* pe de o parte, şi *m* şi *e* pe de cealaltă parte, nu constituie o matematică valabilă.[1]

Se pune o întrebare cât se poate de profundă şi de frumoasă în legătură cu constanta de cuplare determinată experimental, *e* - amplitudinea ca un electron real să emită sau să absoarbă un foton real. Este un simplu număr, a cărui valoare măsurată este aproximativ egală cu -0,08542455. (Prietenii mei fizicieni ar putea să nu recunoască acest număr, deoarece ei preferă să-l țină minte sub forma inversului pătratului său: aproximativ 137,03597, cu o imprecizie în jur de doi pentru ultima zecimală. El a constituit un mister încă de la descoperirea sa, cu mai bine de cincizeci de ani în urmă, şi toți fizicienii teoreticieni care se respectă îşi pun mare pe perete acest număr şi cugetă la el.)

Numaidecât veți dori să ştiți de unde provine acest număr referitor la cuplare: are el vreo legătură cu pi, sau poate cu baza logaritmilor

[1] Un alt mod de a descrie această dificultate, este de a afirma că poate ideea că două puncte pot fi oricât de apropiate între ele este greşită - că presupunerea că putem folosi geometria până la ultimul crâmpei de spațiu este falsă. Dacă luăm distanța minimă posibilă dintre două puncte ca fiind 10^{-100} centimetri (la ora actuală, cea mai mică distanță implicată de vreun experiment este de circa 10^{-16} centimetri) este în regulă, infiniții dispar, dar se ivesc alte inconsistențe, cum ar fi faptul că probabilitatea totală a unui eveniment ne iese a fi puțin peste sau sub 100%, sau că obținem energii negative în cantități infinitezimale. S-a sugerat că aceste inconsistențe apar din cauza faptului că nu am luat în considerare efectele gravitației, care în mod normal sunt foarte, foarte slabe, dar la distanțe de sub 10^{-33} centimetri devin importante.

naturali? Nu ştie nimeni. Este unul dintre *cele mai mari* afurisite de mistere ale fizicii: un *număr magic*, ce ne parvine fără nicio înțelegere din partea noastră. Ați putea spune că „mâna lui Dumnezeu" a scris numărul, şi că „nu cunoaştem în ce fel a manevrat El creionul". Ştim cum să învârtim lucrurile din punct de vedere experimental pentru a putea măsura acest număr cu foarte mare precizie, dar nu ştim cum să le învârtim pentru a face să ne iasă acest rezultat pe calculator... altfel decât tastându-l pe şest!

O teorie bună ar trebui să afirme că *e* este egal cu radical din trei împărțit la doi pi pătrat, sau ceva de genul acesta. Au existat, din când în când, sugestii în legătură cu ce reprezintă *e*, dar niciuna nu s-a dovedit utilă. Mai întâi, Arthur Eddington a demonstrat prin simplă logică, faptul că numărul îndrăgit de fizicieni trebuia să fie 136, valoarea experimentală cunoscută la vremea aceea. Apoi, în momentul în care experimente mai exacte au arătat că numărul este mai aproape de 137, Eddington a descoperit o mică greşeală în argumentarea sa anterioară, şi a demonstrat, încă o dată prin simplă logică, faptul că trebuia să fie vorba de numărul întreg 137! Tot la câtăva vreme, cineva observa că o anumită combinație de pi-uri, şi de e-uri (baza logaritmilor naturali), şi de doiuri, şi de cinciuri, generează misterioasa constantă de cuplare, dar este un lucru nu pe de-a-ntregul apreciat de cei ce jonglează cu aritmetica, faptul că din pi-uri şi din e-uri şi din celelalte, se pot obține surprinzător de *multe* numere. Aşa încât, de-a lungul istoriei fizicii moderne, au existat articole după articole scrise de persoane care au produs un *e* cu mai multe zecimale exacte, numai pentru ca la următoarea îmbunătățire a determinării lui experimentale, numărul respectiv să nu mai concorde cu valoarea măsurată.

Chiar dacă astăzi trebuie să recurgem la o procedură fără noimă pentru a-l calcula pe *j*, este posibil ca într-o bună zi să se descopere o legătură matematică legitimă între *j* şi *e*. Aceasta ar însemna ca *j* să fie numărul mişterios din care provine *e*. În acest caz, fără doar şi poate că ar urma o nouă avalanşă de articole, care să ne învețe cum să-l calculăm pe *j* „cu mâna liberă", ca să mă exprim astfel, propunând să împărțim unu la patru pi, ori mai ştiu eu ce.

Cu aceasta, am terminat de expus necazurile legate de electrodinamica cuantică.

Atunci când am plănuit să țin aceste prelegeri, am intenționat să mă concentrez doar asupra acelei părți a fizicii pe care o cunoaştem foarte bine – să o descriu în întregime şi să nu mai spun nimic altceva.

Dar acum, că am ajuns până în acest punct, fiind profesor (adică, având obiceiul să nu mă pot opri din vorbit atunci când trebuie), nu pot rezista tentației să nu vă spun unele lucruri despre restul fizicii. În primul rând, trebuie să vă spun imediat că restul fizicii nu a fost verificat nici pe departe la fel de bine ca electrodinamica: unele dintre lucrurile pe care vi le voi pomeni reprezintă ghiceli de bun simț, altele constituie teorii elaborate parțial, iar altele încă sunt pure speculații. Ca urmare, prin comparație cu celelalte prelegeri, această prezentare o să arate oarecum ca un talmeş-balmeş: va fi incompletă şi cu multe detalii lipsă. Cu toate acestea, se dovedeşte că structura teoriei QED serveşte drept o excelentă bază de descriere a altor fenomene din restul fizicii.

Voi începe prin a discuta despre protoni şi neutroni, care alcătuiesc nucleele atomilor. Atunci când au fost descoperiți, s-a crezut că protonii şi neutronii sunt nişte simple particule, dar foarte curând a devenit limpede că ele nu sunt simple - simple, în sensul că amplitudinea lor de a se deplasa dintr-un punct în altul să poată fi exprimată cu formula E(de la A la B), prin introducerea unei alte valori pentru numărul *n*. De exemplu, protonul are un moment magnetic care, dacă este calculat în aceeaşi manieră ca pentru electron, ar trebui să aibă o valoare apropiată de 1. Dar, de fapt, experimental valoarea lui iese cu totul aiurea: 2,79! În consecință, a devenit repede evident că în interiorul protonului se întâmplă ceva de care ecuațiile electrodinamicii cuantice nu pot da socoteală. Iar neutronul, care, dacă ar fi într-adevăr neutru, nu ar trebui să prezinte deloc interacțiune magnetică, are un moment magnetic în jur de −1,93! Deci, s-a ştiut de multă vreme că şi cu interiorul neutronului este ceva putred.

Mai exista şi problema referitoare la ce anume îi ține pe protoni şi pe neutroni laolaltă în interiorul nucleului. S-a realizat imediat că nu putea fi vorba de schimbul de fotoni, deoarece forțele care mențineau nucleul legat erau mult mai puternice - energia necesară ruperii unui nucleu era mult mai mare decât cea necesară îndepărtării unui electron dintr-un atom, în aceeaşi măsură în care o bombă atomică este mult mai distructivă decât dinamita: explozia dinamitei reprezintă rearanjarea tiparelor de electroni, pe când explozia bombei atomice reprezintă rearanjarea tiparelor protoni-neutroni.

Pentru a se afla mai multe în legătură cu ce anume menține nucleele legate, au fost efectuate experimente în care protoni cu energii din ce în ce mai mari erau izbiți de nuclee. Se aştepta să rezulte numai protoni şi neutroni. Însă, atunci când energiile deveneau suficient de mari, apăreau noi particule. Mai întâi, a fost vorba de pioni, apoi de

lambda-uri, şi de sigma-uri, şi de rho-uri, până când au rămas fără litere din alfabet. Au urmat apoi particule numite cu numere (masele lor), cum ar fi sigma 1190 şi sigma 1386. Curând a devenit limpede că numărul de particule din lume era nelimitat, şi că depindea de cantitatea de energie folosită la ruperea nucleului. În prezent sunt peste patru sute de astfel de particule. Patru sute de particule este de neacceptat; este prea complicat![2]

Mari descoperitori precum Murray Gell-Mann, aproape că şi-au pierdut minţile încercând să se prindă de regulile după care se comportă toate aceste particule, şi la începutul anilor '70 au venit cu teoria cuantică a interacţiunilor tari (sau „cromodinamica cuantică"), ai cărei actori principali sunt nişte particule numite „quarkuri". Toate particulele alcătuite din quarkuri se încadrează în două clase: unele, precum protonul şi neutronul, sunt compuse din trei quarkuri (şi poartă oribilul nume de „barioni"); celelalte, cum ar fi pionii, sunt alcătuite dintr-un quark şi un antiquark (şi sunt numite „mezoni").

Daţi-mi voie să construiesc un tabel al particulelor fundamentale, aşa cum ne apar ele nouă astăzi (a se vedea Figura 79). Voi începe cu particulele care se deplasează dintr-un punct în altul potrivit formulei E(de la A la B) - modificată pe baza unor reguli de polarizare la fel ca cele ale electronului - numite particule cu „spin 1/2". Prima dintre aceste particule este electronul, iar numărul corespunzător masei este 0,511, exprimat în unităţi pe care le folosim tot mereu, numite MeV.[3]

Sub căsuţa cu electronul voi lăsa un spaţiu liber (care va fi completat mai târziu), iar sub acesta voi trece două tipuri de quarkuri: *d* şi respectiv *u*. Masa acestor quarkuri nu este cunoscută cu exactitate; o ipoteză plauzibilă este undeva în jurul a 10 MeV pentru fiecare din ele. (Neutronul este un pic mai greu decât protonul, ceea ce pare să implice faptul că - aşa cum veţi vedea imediat - quarkul *d* este oarecum mai greu decât quarkul *u*.)

În dreptul fiecărei particule voi trece sarcina sa, sau constanta de cuplare, în termeni de $-j$, numărul corespunzător cuplării cu fotonii luat cu semn schimbat. Aceasta face ca sarcina pentru electron să fie -1, consistentă cu o convenţie iniţiată de Benjamin Franklin, convenţie rămasă până în ziua de azi. Pentru quarkul *d*, amplitudinea de cuplare

---

[2] Deşi în experimentele la energii înalte, din nucleu rezultă multe particule, în experimentele la energii joase - în condiţiile mai obişnuite - se găseşte că nucleele conţin numai protoni şi neutroni.

[3] Un MeV reprezintă o cantitate foarte mică - potrivită pentru astfel de particule - şi corespunde unei mase de aproximativ $1{,}78 \times 10^{-27}$ grame.

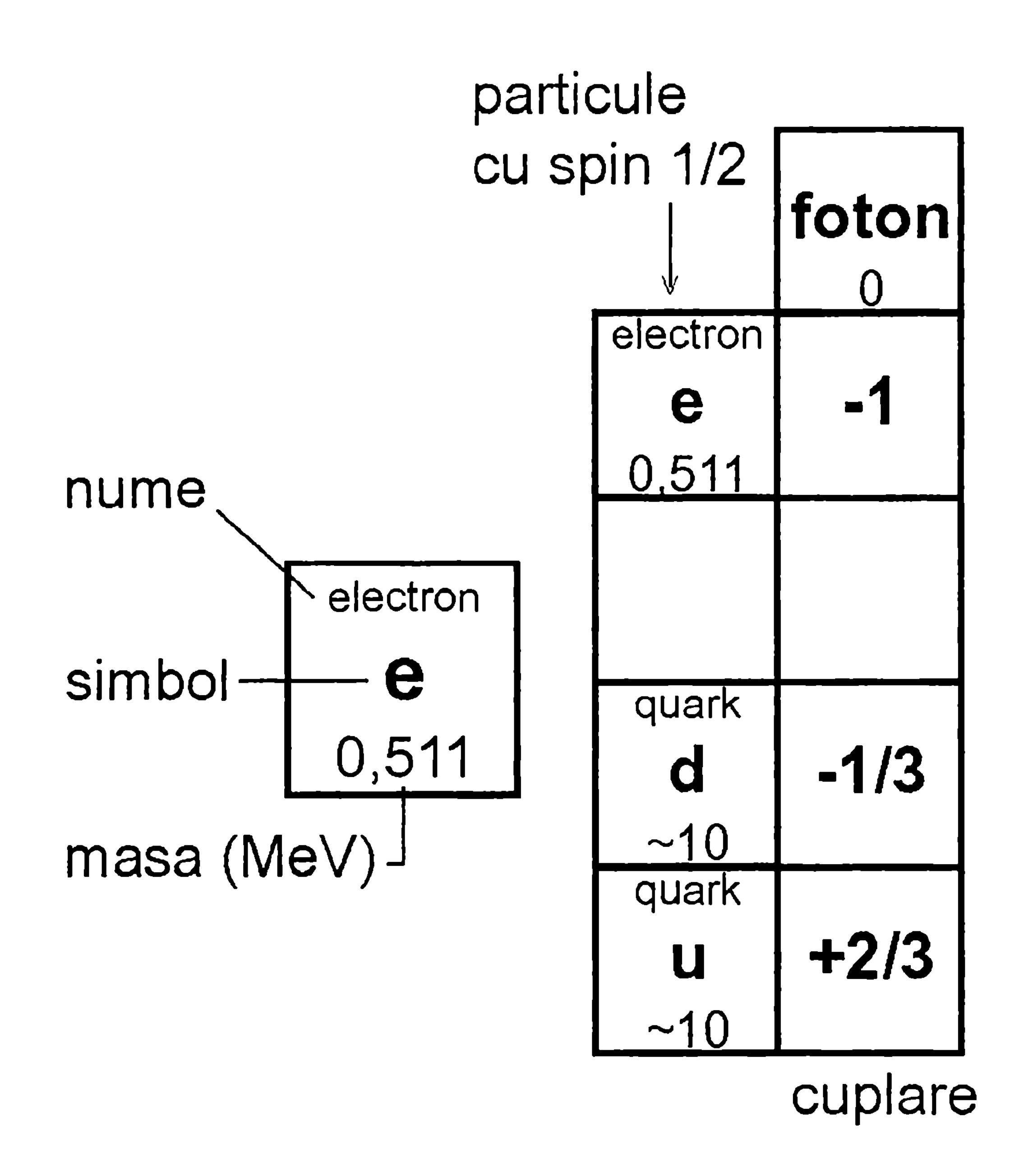


Figura 79. Lista noastră cu toate particulele de pe lumea asta, începe cu particulele cu „spin 1/2": electronul (având o masă de 0,511 MeV) şi două „arome" de quarkuri, *d* şi *u* (ambele cu o masă de aproximativ 10 MeV). Electronii şi quarkurile prezintă „sarcină" - adică, se pot cupla cu fotonii - în următoarele măsuri (în termeni de constanta de cuplare *-j*): -1, -1/3 şi +2/3.

cu un foton este -1/3, iar pentru quarkul *u* ea este +2/3. (Dacă ar fi ştiut Benjamin Franklin de existenţa quarkurilor, ar fi putut măcar conveni că sarcina electronului este -3!)

Acuma, sarcina unui proton este +1, iar a unui neutron este 0. Învârtind un pic numerele, se observă că un proton - alcătuit din trei quarkuri - trebuie să fie compus din două *u*-uri şi un *d*, în vreme ce un neutron - alcătuit tot din trei quarkuri - trebuie să fie compus din două *d*-uri şi un *u* (a se vedea Figura 80).

Ce anume menţine quarkurile laolaltă? Este oare vorba de fotonii care se duc de colo-colo? (Quarkurile, ca şi electronii, emit şi absorb fotoni, quarkul *d* având sarcina -1/3, iar quarkul *u* având sarcina +2/3.) Nu, forţele electrice sunt prea slabe pentru a face aceasta. S-a inventat ceva nou care să se perinde de colo-colo şi să ţină quarkurile laolaltă;

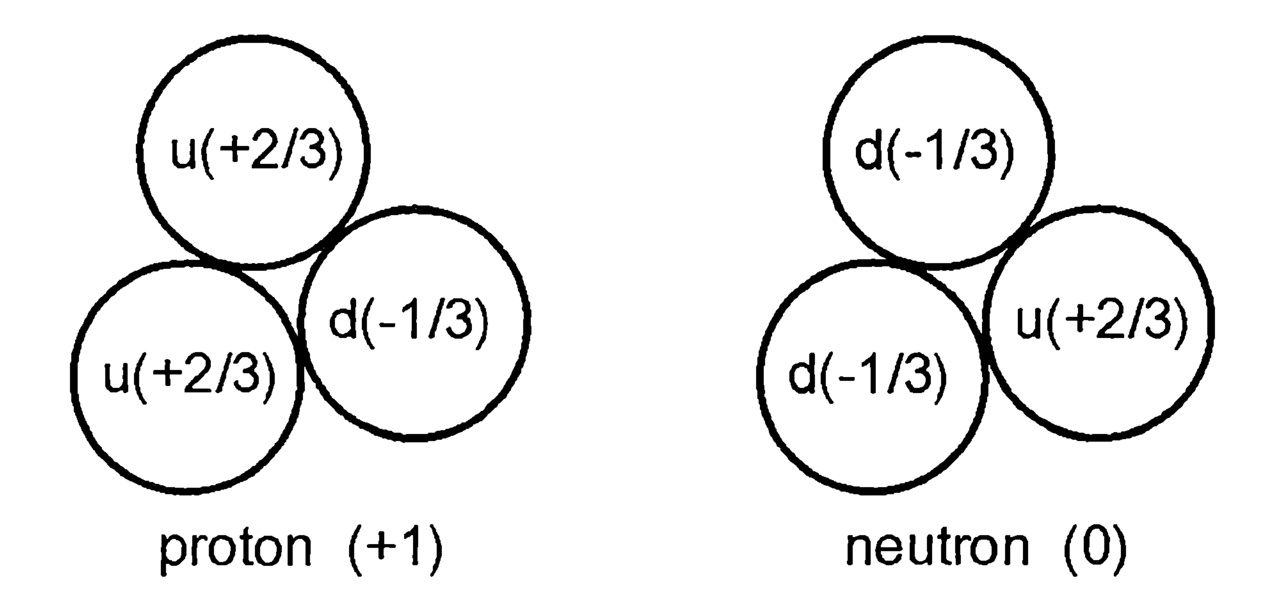


Figura 80. Toate particulele alcătuite din quarkuri se încadrează în una sau cealaltă din două clase posibile: cele compuse dintr-un quark şi un antiquark, şi cele compuse din trei quarkuri. Dintre acestea din urmă, protonii şi neutronii reprezintă exemplele cele mai obişnuite. Sarcinile quarkurilor *d* şi *u* se combină pentru a da +1 pentru proton şi 0 pentru neutron. Faptul că protonul şi neutronul se compun din nişte particule cu sarcină, care se mişcă în interiorul lor, ne oferă un indiciu în legătură cu motivul pentru care protonul are un moment magnetic mai mare ca 1, iar neutronul, care se presupune a fi neutru, prezintă moment magnetic în primă instanţă.

ceva numit „gluoni".[4] Gluonii constituie un exemplu de alt gen de particulă cu „spin 1" (la fel ca fotonii); ei se deplasează dintr-un punct în altul cu o amplitudine ce se determină cu exact aceeaşi formulă ca pentru fotoni, F(de la A la B). Amplitudinea corespunzătoare emiterii sau absorbţiei gluonilor de către quarkuri este un misterios număr *g*, mult mai mare decât *j* (a se vedea Figura 81).

Diagramele pe care le trasăm pentru a reprezenta quarkuri schimbând gluoni sunt foarte asemănătoare cu cele pe care le desenăm pentru electroni schimbând fotoni (a se vedea Figura 82). Atât de asemănătoare,

[4] Observaţi numele: „foton" vine de la cuvântul grecesc care înseamnă lumină; „electron" vine de la cuvântul grecesc care înseamnă chihlimbar, substanţa la care s-au observat prima dată proprietăţi electrice. Dar, pe măsură ce fizica a progresat, s-a manifestat o scădere a interesului pentru numirea particulelor cu cuvinte din greaca veche, şi s-a ajuns la cuvinte precum „gluoni". Vă daţi seama de ce le zice aşa [*glue* = *lipici*, în limba engleză, în original (n.t.)]. În fapt, numele *d* şi *u* provin şi ele tot din cuvinte englezeşti, dar n-aş vrea să vă dezorientez - un quark *d* nu este prin nimic mai „jos" [*down*, în limba engleză, în original (n.t.)], la fel cum unul *u* nu este prin nimic mai „sus" [*up*, în limba engleză, în original (n.t.)]. Pentru că tot a venit vorba, *d*-imea ori *u*-imea poartă numele de „arome" ale quarkului.

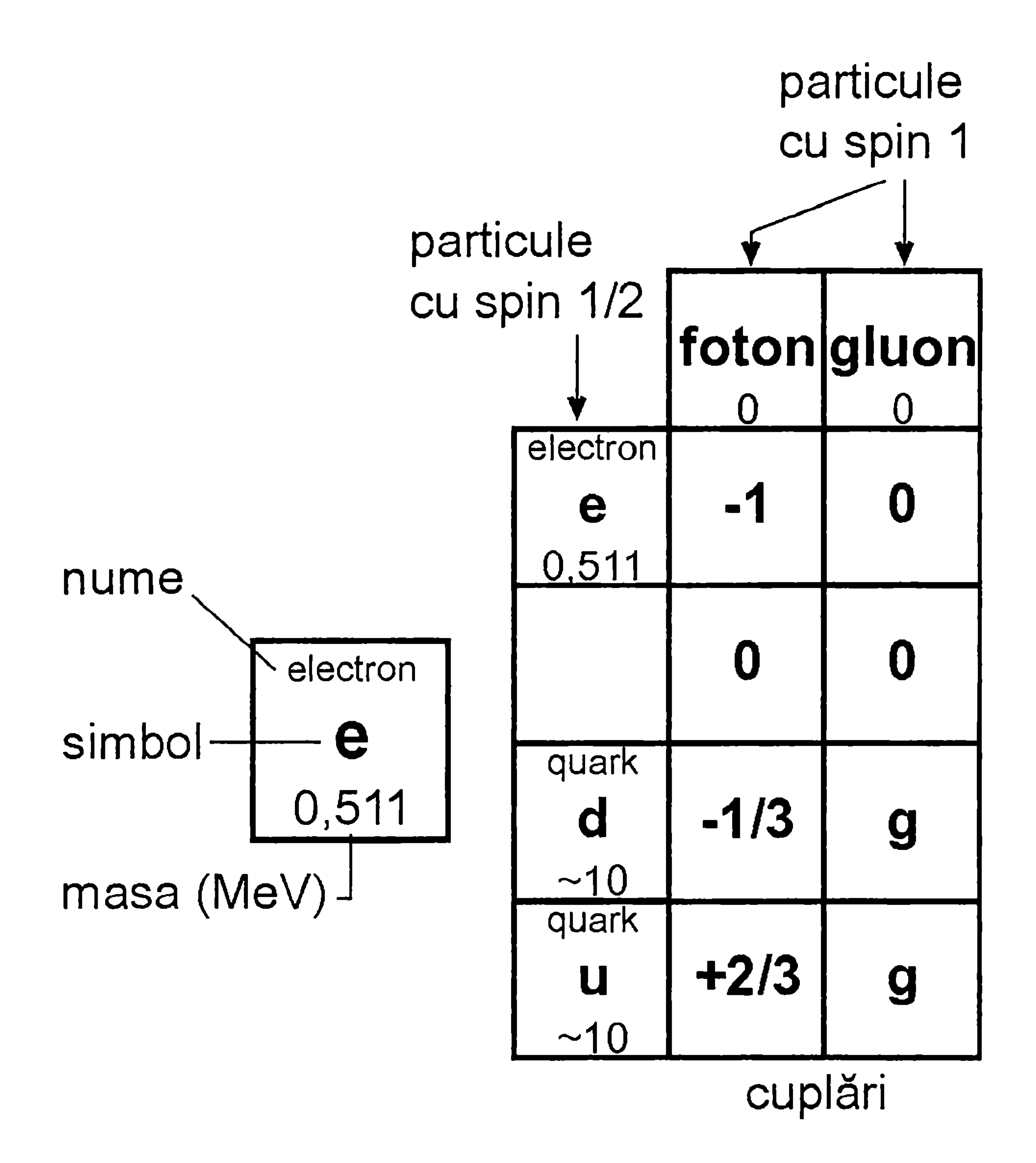


Figura 81. „Gluonii" mențin quarkurile laolaltă pentru a alcătui protoni și neutroni, și dau în mod indirect socoteală de faptul că protonii și neutronii stau împreună în nucleul atomic. Gluonii mențin quarkurile laolaltă prin forțe mult mai tari decât forțele electrice. Constanta de cuplare a gluonilor, g, este mult mai mare decât j, ceea ce face foarte dificilă calcularea termenilor ce includ cuplări: la momentul actual, cea mai mare precizie la care se poate spera este de doar 10%.

în fapt, încât ați putea spune că fizicienii sunt lipsiți de imaginație, că doar au copiat teoria electrodinamicii cuantice și au aplicat-o la interacțiunile tari! Și așa este: exact asta am făcut, dar cu un mic amendament.

Quarkurile prezintă un tip suplimentar de polarizare, care nu are legătură cu geometria. Idioții de fizicieni, incapabili să mai vină cu vreun minunat cuvânt grecesc, au denumit acest tip de polarizare cu termenul nefericit de „culoare", termen ce nu are nici o legătură cu ceea ce înțelegem noi în mod normal prin cuvântul culoare. La un moment de timp dat, un quark se poate găsi în una din următoarele

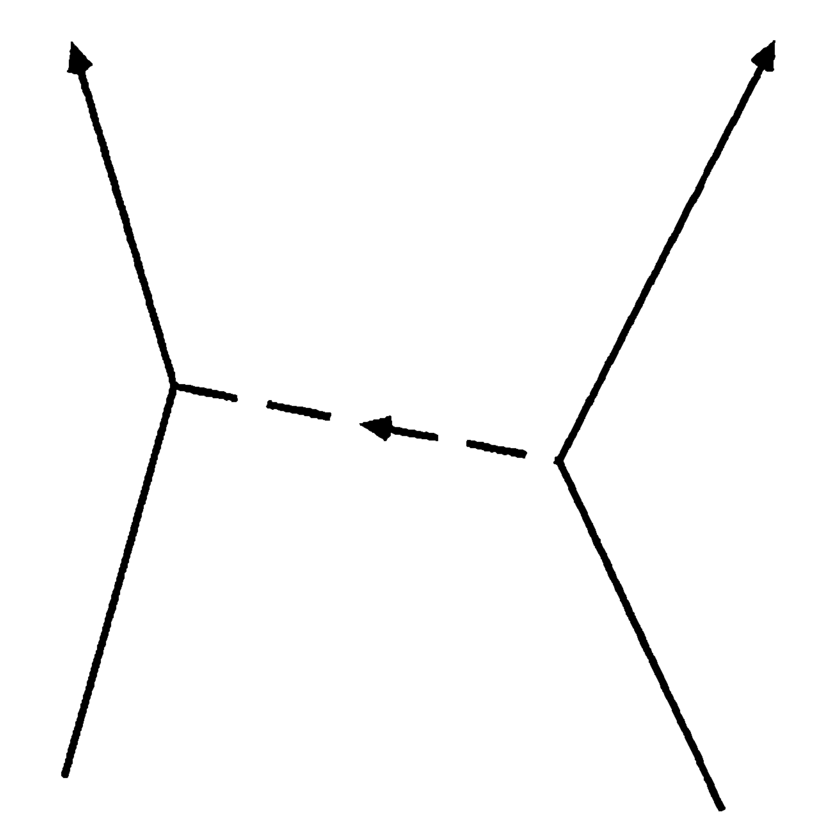


Figura 82. Diagrama uneia din modalitățile în care două quarkuri pot schimba un gluon între ele este atât de asemănătoare cu diagrama a doi electroni schimbând un foton, încât ați putea crede că fizicienii pur și simplu au copiat teoria electrodinamicii cuantice și au aplicat-o la „interacțiunile tari" care mențin laolaltă quarkurile în interiorul protonilor și neutronilor. Ei bine, asta au făcut... aproximativ.

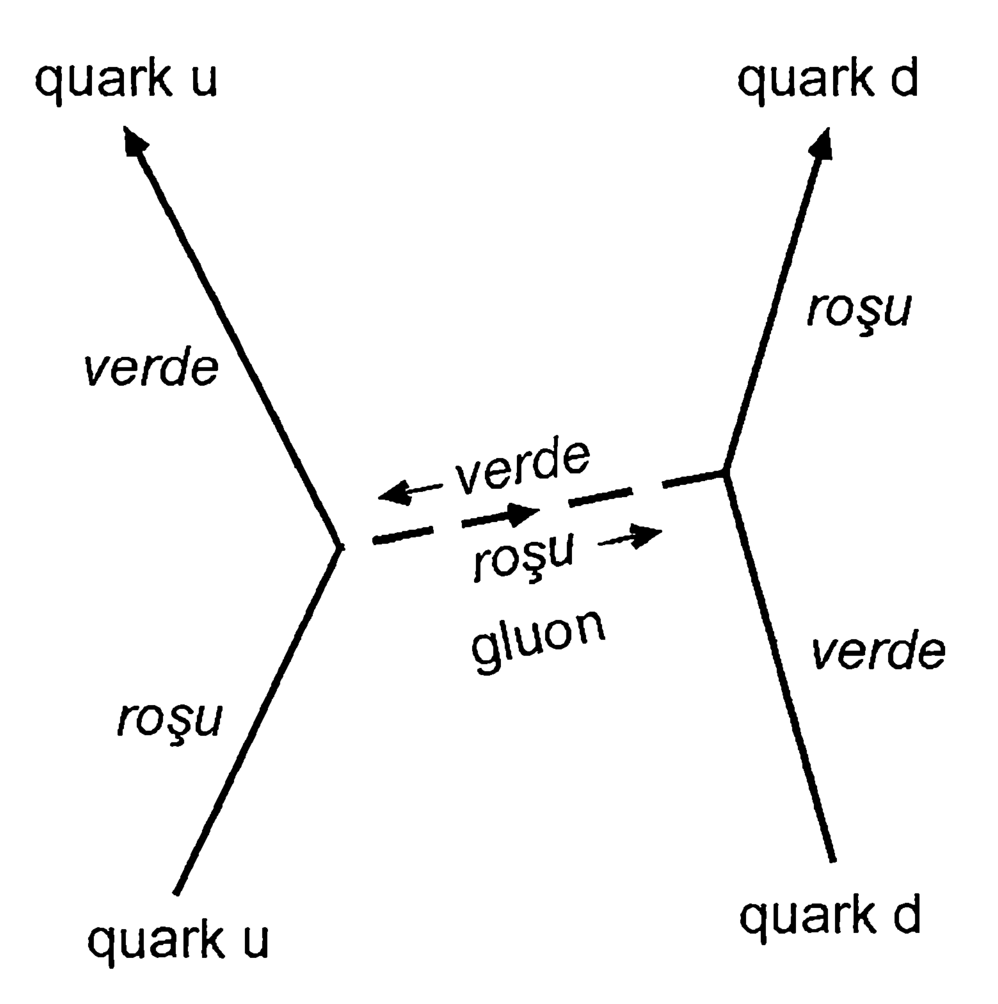


Figura 83. Teoria gluonilor diferă de electrodinamică prin faptul că ei se cuplează cu niște chestii care sunt „colorate" (și care se pot afla în una din stările „roșu", „verde" sau „albastru"). În exemplul de față, un quark *u* roșu se transformă în unul verde, emițând un gluon roșu-antiverde, ce este absorbit de un quark *d* verde, care devine roșu. (În cazul în care „culoarea" este transportată înapoi în timp, ea primește prefixul „anti".)

trei situații, sau „culori": R, G, sau B (ghiciți de la ce vine?) [*Red*, *Green*, *Blue* = *Roşu*, *Verde*, *Albastru*, în limba engleză, în original (n.t.)]. Culoarea quarkului se poate schimba atunci când el emite sau absoarbe un gluon. Gluonii sunt de opt feluri, în funcție de „culorile" cu care se cuplează. De exemplu, dacă un quark roşu se transformă în verde, el emite un gluon roşu-antiverde - un gluon care îi ia quarkului roşeața şi îi dă verzeală („antiverde" vrea să spună că gluonul transportă verzeală în direcție opusă). Acest gluon ar putea fi absorbit de un quark verde, care s-ar încărca astfel cu roşu (a se vedea Figura 83). Există opt posibili gluoni diferiți, cum ar fi roşu-antiroşu, roşu-antiverde, roşu-antialbastru şi aşa mai departe (ați fi înclinați să credeți că ar trebui să fie nouă, însă, din motive tehnice, unul lipseşte). Teoria nu este foarte complicată. Întreaga regulă referitoare la gluoni este atât: gluonii se cuplează cu nişte chestii „colorate" - nu este nevoie decât de puțină contabilitate, pentru a ține socoteala „culorilor".

Există, totuşi, o posibilitate interesantă generată de această regulă: gluonii se pot cupla cu alți gluoni (a se vedea Figura 84). De pildă, un gluon verde-antialbastru, întâlnindu-se cu unul roşu-antiverde, generează un gluon roşu-antialbastru. Teoria gluonilor este foarte simplă: pur şi simplu, trasați diagramele şi urmăriți „culorile". Pentru toate diagramele, tăria cuplărilor se determină pe baza constantei de cuplare a gluonilor, *g*.

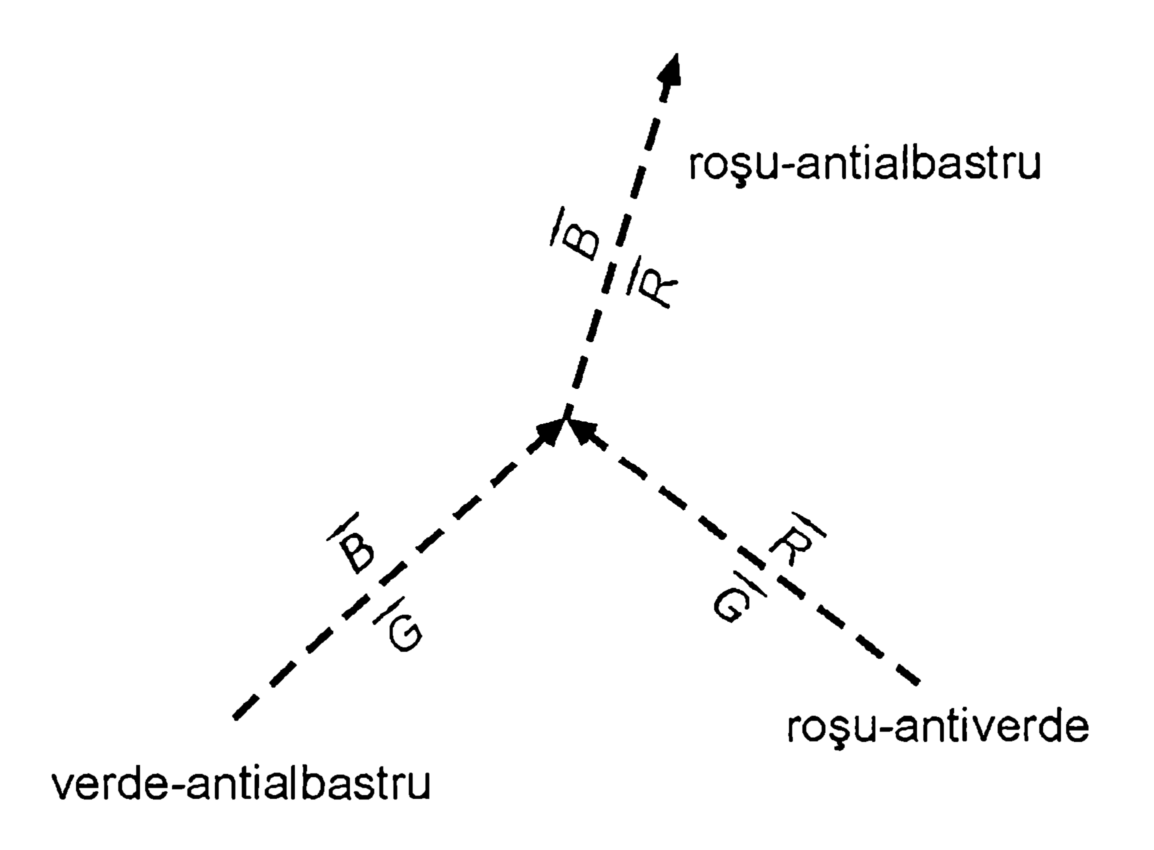


Figura 84. Din moment ce gluonii sunt ei înşişi „colorați", ei se pot cupla între ei. În exemplul de față, un gluon verde-antialbastru se cuplează cu unul roşu-antiverde, pentru a forma un gluon roşu-antialbastru. Teoria gluonilor este uşor de înțeles: pur şi simplu, urmăriți „culorile".

Teoria gluonilor nu este, într-adevăr, prea mult diferită de electrodinamica cuantică. De exemplu, cât de mult concordă valoarea observată a momentului magnetic al protonului, cu cea calculată cu ajutorul teoriei?

Experimentele sunt foarte precise; ele indică pentru momentul magnetic valoarea 2,79273. În cel mai bun caz, teoria poate veni cu un 2,7, plus sau minus 0,3 - asta dacă eşti suficient de optimist în privinţa preciziei calculelor tale - aceasta însemnând o eroare de 10%, adică de 10.000 de ori mai puţin exactă decât experimentul! Dispunem de o teorie simplă, bine precizată, care se presupune că ar explica toate proprietăţile protonilor şi neutronilor, şi totuşi nu putem calcula nimic cu ea, din cauză că matematica implicată este prea grea pentru noi. (Cred că puteţi bănui la ce anume lucrez actualmente şi nu ajung la niciun rezultat.) Motivul pentru care nu putem face calcule cu oricâtă precizie este valoarea mult mai mare a constantei de cuplare pentru gluoni, *g*, decât a celei corespunzătoare electronilor. Termenii cu două, patru, sau chiar cu şase cuplări, nu reprezintă doar nişte corecţii minore la amplitudinea principală, ci constituie contribuţii semnificative, ce nu pot fi ignorate. Ca atare, există săgeţi corespunzătoare atât de multor posibilităţi, încât nu am fost în stare să le organizăm de o manieră rezonabilă pentru a găsi cât este săgeata finală.

În cărţi scrie că ştiinţa este simplă: construieşti o teorie şi o compari cu experimentul; dacă teoria nu merge, o arunci şi construieşti alta. În situaţia de faţă avem o teorie bine precizată şi dispunem de sute de experimente, dar nu le putem compara! Este o situaţie care nu a mai existat vreodată în fizică. Suntem blocaţi, pentru moment, de incapacitatea de a veni cu o metodă de calcul. Suntem îngropaţi sub mulţimea de săgetuţe.

În ciuda dificultăţilor de calcul ale teoriei, din punct de vedere calitativ înţelegem anumite lucruri legate de cromodinamică (de interacţiunile tari ale quarkurilor şi gluonilor). Obiectele pe care le vedem că sunt alcătuite din quarkuri, sunt „colorate" neutru: avem grupuri de câte trei quarkuri, câte unul de fiecare „culoare", iar perechile quark-antiquark au amplitudini egale de a fi roşu-antiroşu, verde-antiverde, ori albastru-antialbastru. Înţelegem, de asemenea, motivul pentru care quarkurile nu pot fi produse ca particule individuale - din ce cauză anume, indiferent de cât de multă energie se foloseşte pentru izbirea unui nucleu cu un proton, în loc să vedem sărind quarkuri individuale, observăm o jerbă de mezoni şi barioni (perechi quark-antiquark şi grupuri de trei quarkuri).

Cromodinamica cuantică şi electrodinamica cuantică nu epuizează fizica. Potrivit lor, un quark nu-şi poate schimba „aroma“: ce este quark *u*, quark *u* rămâne; ce este quark *d*, quark *d* rămâne. Însă, uneori, natura se comportă diferit. Există o formă de radioactivitate ce se desfăşoară lent - genul de radioactivitate de care lumea se teme să nu scape din cadrul reactoarelor nucleare - numită dezintegrare beta. Ea implică transformarea unui neutron în proton. Cum neutronul constă din două quarkuri de tip *d* şi unul de tip *u*, în vreme ce protonul constă din două quarkuri *u* şi unul *d*, înseamnă că ceea ce se întâmplă propriu-zis este schimbarea unui quark de tip *d* al neutronului într-un quark de tip *u* (a se vedea Figura 85). Iată cum se întâmplă aceasta: quarkul *d* emite o chestie mică, asemenea unui foton, numită W, care se cuplează cu un electron şi cu încă o nouă particulă, numită antineutrin - un neutrin mergând înapoi în timp. Neutrinul reprezintă o altă particulă de tipul celor cu spin 1/2 (precum electronul şi quarkurile), dar nu are masă şi sarcină (nu interacţionează cu fotonii). De asemenea, el nu interacţionează nici cu gluonii; doar se cuplează cu W (a se vedea Figura 86).

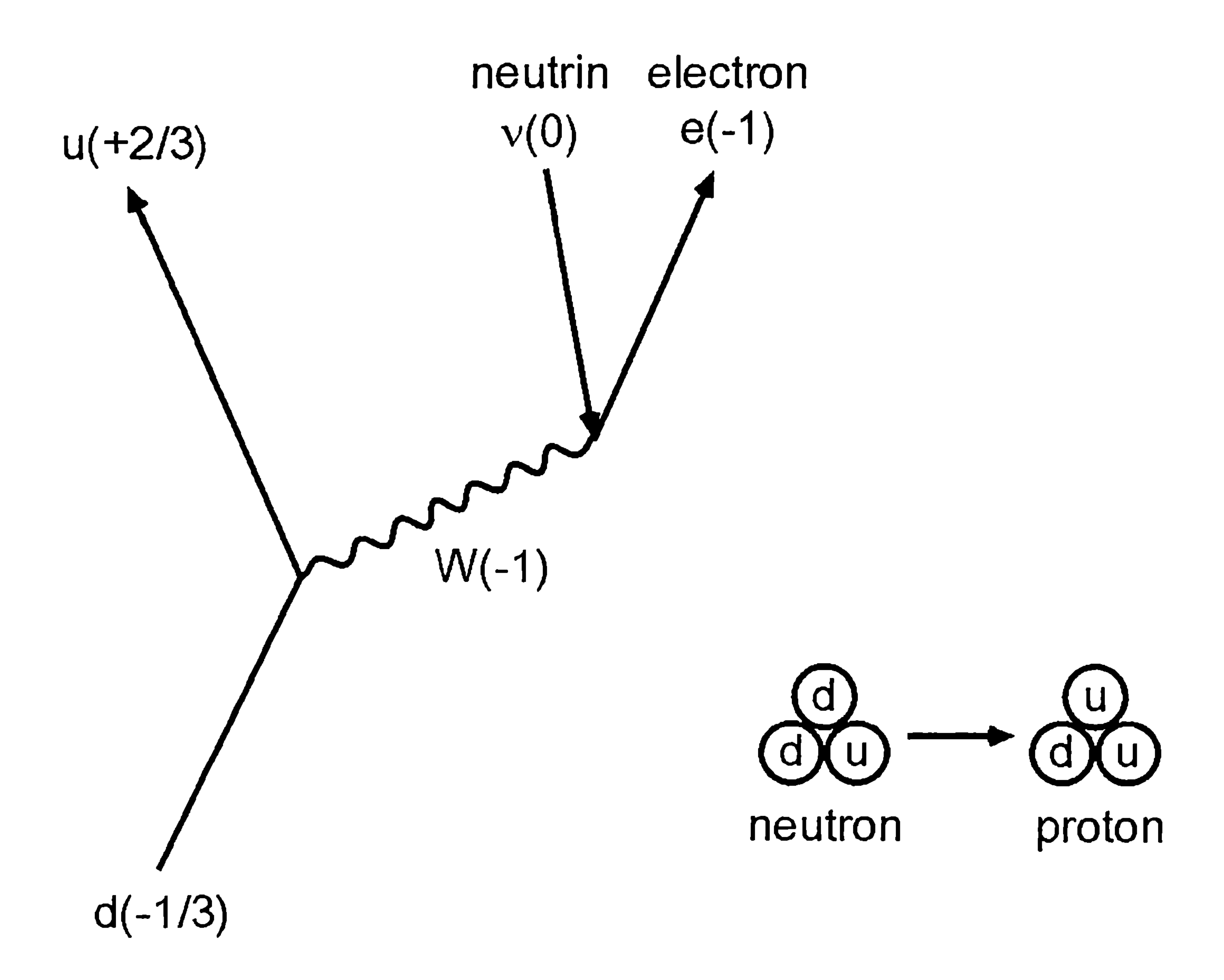


Figura 85. Atunci când un neutron se dezintegrează într-un proton (un proces numit „dezintegrare beta“), singurul lucru care se schimbă este „aroma“ unuia din quarkuri. Acest proces se desfăşoară relativ lent, aşa încât a fost propusă o particulă intermediară (numită „boson intermediar W“) cu masă foarte mare (aproximativ 80.000 MeV) şi sarcină -1.

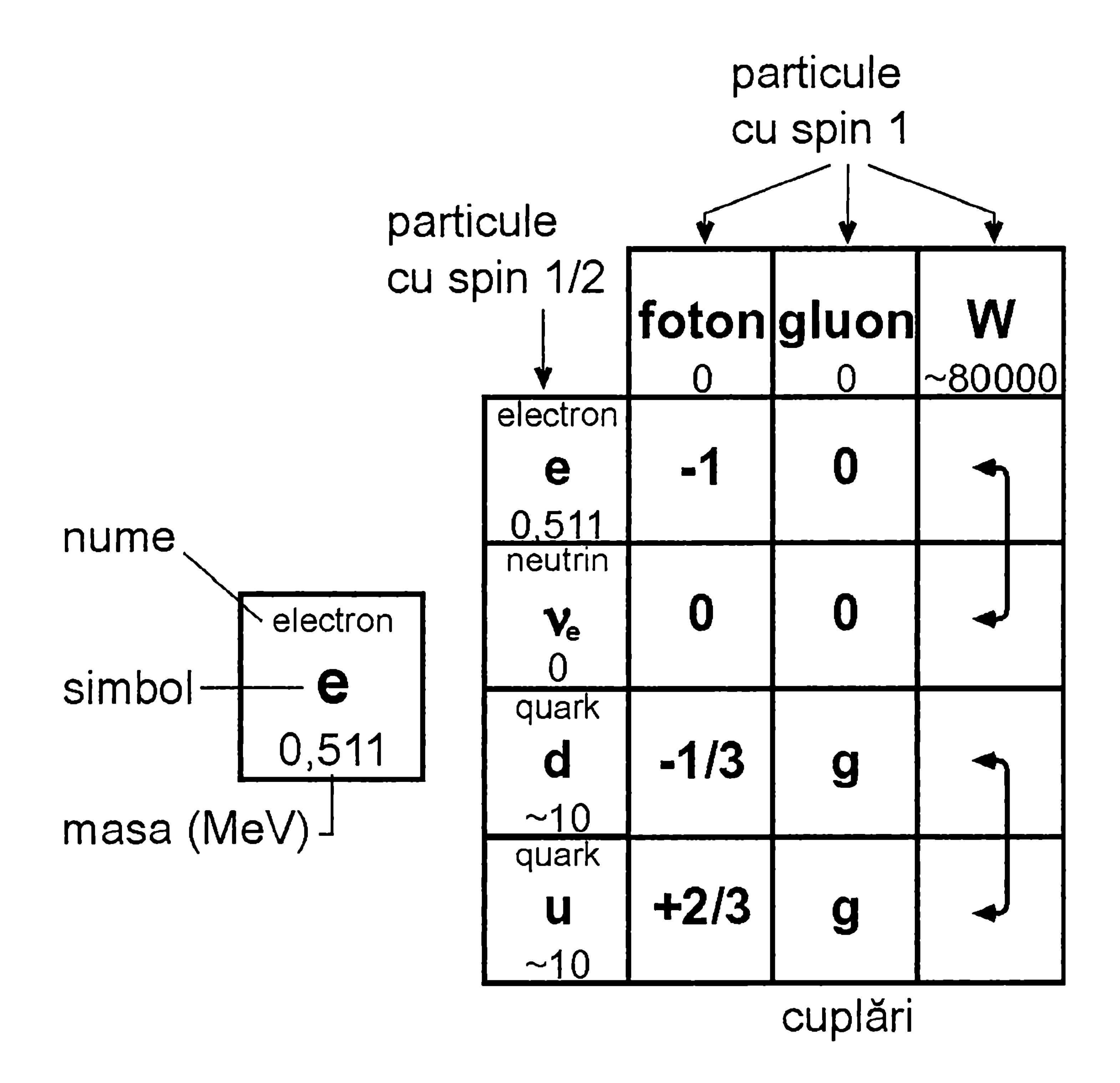


Figura 86. Bosonul W se cuplează pe de o parte cu electronul şi neutrinul, iar pe de altă parte cu quarkurile *d* şi *u*.

W este o particulă de tipul celor cu spin 1 (precum fotonul şi gluonii), care modifică „aroma“ unui quark şi îi preia sarcina: quarkul *d*, cu sarcina -1/3, se transformă în quark *u*, cu sarcina +2/3, diferenţa fiind de -1. (El nu schimbă „culoarea“ quarkului.) Din cauza faptului că W_- preia sarcina -1 (iar antiparticula sa corespunzătoare, W_+, preia sarcina +1), el se poate cupla şi cu un foton. Dezintegrarea beta durează mult mai mult decât interacţiunile fotonilor şi electronilor, fapt pentru care se crede că W, spre deosebire de fotoni şi electroni, trebuie să aibă o masă foarte mare (circa 80.000 MeV). Din cauza energiei foarte înalte necesare pentru a elibera o particulă cu masă atât de mare, nu am fost capabili să observăm vreun W de sine stătător.[5]

[5] După susţinerea acestor prelegeri, s-au realizat energii suficient de înalte pentru a produce un W de sine stătător, iar masa sa măsurată experimental s-a dovedit foarte apropiată de valoarea prezisă de teorie.

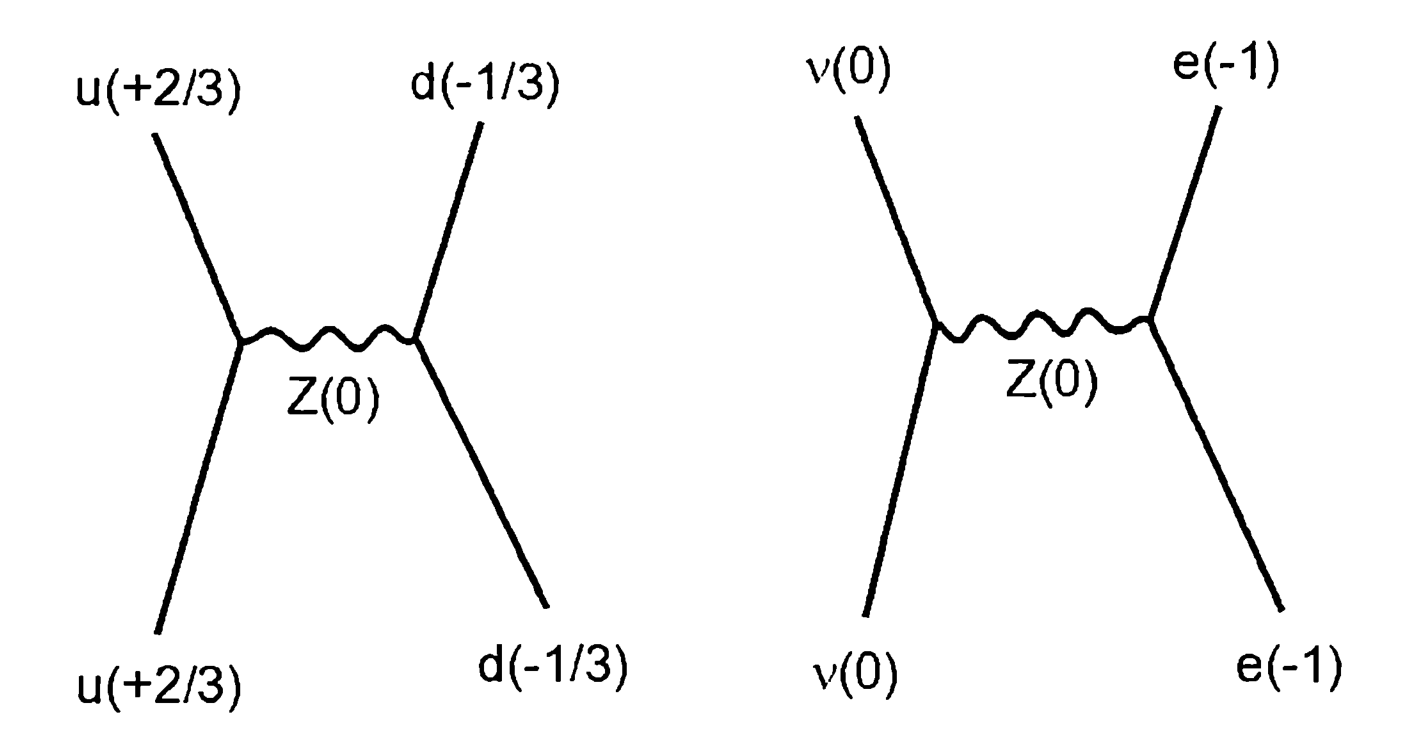


Figura 87. Atunci când nu se înregistrează nicio schimbare a sarcinii niciunei particule, W-ul nu are nici el sarcină (el este numit în acest caz Z_0). Astfel de interacțiuni sunt numite „curenți neutri". Pe desen sunt prezentate două asemenea posibilități.

Există o altă particulă, pe care am putea-o gândi drept un W neutru, numită Z_0. Z_0 nu modifică sarcina unui quark, dar se poate cupla cu un quark *d*, cu un quark *u*, cu un electron, sau cu un neutrin (a se vedea Figura 87). Această interacțiune poartă înşelătorul nume de „curenți neutri", iar descoperirea ei în urmă cu câțiva ani a produs multă agitație.

Dacă se admite posibilitatea unei cuplări triple între trei tipuri de W-uri (a se vedea Figura 88), teoria W-urilor iese simplă şi drăguță. Constanta de cuplare măsurată pentru W-uri este în mare măsură aceeaşi ca pentru foton - undeva în jurul valorii *j*. În consecință, există posibilitatea ca cele trei W-uri şi fotonul să reprezinte aspecte diferite ale aceluiaşi lucru. Stephen Weinberg şi Abdus Salam au încercat să combine electrodinamica cuantică cu ceea ce numim „interacțiunile slabe" (interacțiunile cu W-uri) într-o singură teorie cuantică, şi au reuşit. Dar dacă pur şi simplu priveşti rezultatele pe care ei le obțin, poți sesiza ața albă, ca să spunem aşa. Este foarte clar că fotonul şi cei trei W sunt cumva interconectați, dar, la nivelul actual de înțelegere, este greu de văzut limpede legătura - încă se mai văd „însăilările" între teorii, nu s-a reuşit netezirea cusăturilor într-atât încât îmbinarea să devină mai frumoasă şi, în consecință, probabil mai corectă.

Deci, situația se prezintă astfel: teoria cuantică are trei tipuri principale de interacțiuni - „interacțiunile tari" ale quarkurilor şi gluonilor, „interacțiunile slabe" ale W-urilor, şi „interacțiunile electrice" ale fotonilor. Singurele particule din lume (potrivit acestei viziuni) sunt quarkurile (cu „aromele" *u* şi *d*, fiecare cu câte trei „culori"), gluonii (opt combinații de R, G şi B), W-urile (cu sarcinile ±1 şi 0), neutrinul,

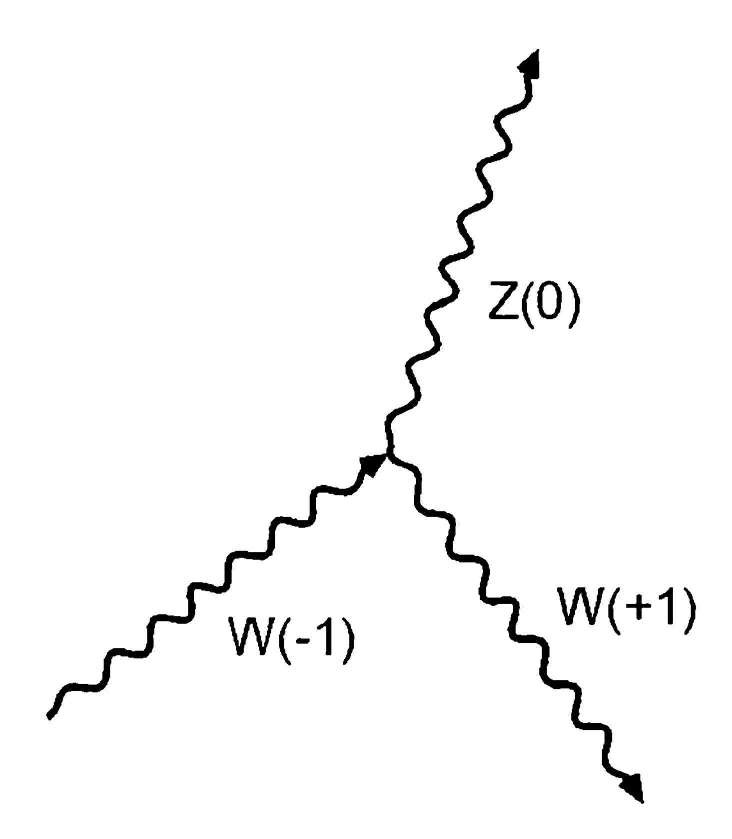


Figura 88. Este posibilă o cuplare între un W_{-1}, antiparticula sa (un W_{+1}) şi un W neutru (Z_0). Constanta de cuplare pentru W-uri are valoare apropiată de *j*, aceasta sugerând că W-urile şi fotonii ar putea fi aspecte diferite ale aceluiaşi lucru.

electronul şi fotonul - aproximativ douăzeci de particule distincte, de şase tipuri diferite (plus antiparticulele lor). În jur de douăzeci de particule diferite, nu e prea rău... numai că nu e totul.

Pe măsură ce nucleele au fost bombardate cu protoni la energii din ce în ce mai mari, au continuat să apară noi particule. O astfel de particulă este miuonul, care este în toate privințele la fel ca electronul, cu singura deosebire că are masa mult mai mare - 105,8 MeV, față de 0,511 MeV, cât are electronul; altfel spus, este de circa 206 ori mai greu. Este ca şi când Dumnezeu ar fi vrut pur şi simplu să încerce altă valoare a masei! Toate proprietățile miuonului pot fi complet descrise de teoria electrodinamicii: constanta de cuplare este aceeaşi, *j*, iar E(de la A la B) este şi ea aceeaşi; doar trebuie introdusă o altă valoare pentru *n*.[6]

---

[6] Momentul magnetic al miuonului a fost măsurat cu mare exactitate, şi s-a găsit că el are valoarea 1,001165924 (cu o imprecizie de 9 pentru ultima zecimală), în vreme ce pentru electron el este egal cu 1,00115965221 (cu o imprecizie de 3 pentru ultima zecimală). S-ar putea să fiți curioşi în privința motivului pentru care momentul magnetic al miuonului este un pic mai mare decât cel al electronului. În una din diagramele pe care le-am desenat, un electron emitea un foton, care se dezintegra într-o pereche pozitron-electron (a se vedea Figura 89). Există o mică amplitudine ca fotonul emis să producă o pereche miuon-antimiuon, care este mai grea decât electronul originar. Acest lucru este asimetric, deoarece atunci când miuonul emite un foton, dacă acel foton generează o pereche pozitron-electron, aceştia din urmă sunt *mai uşori* decât miuonul originar. Teoria electrodinamicii cuantice descrie cu exactitate *orice* proprietate electrică, atât a miuonilor, cât şi a electronilor.

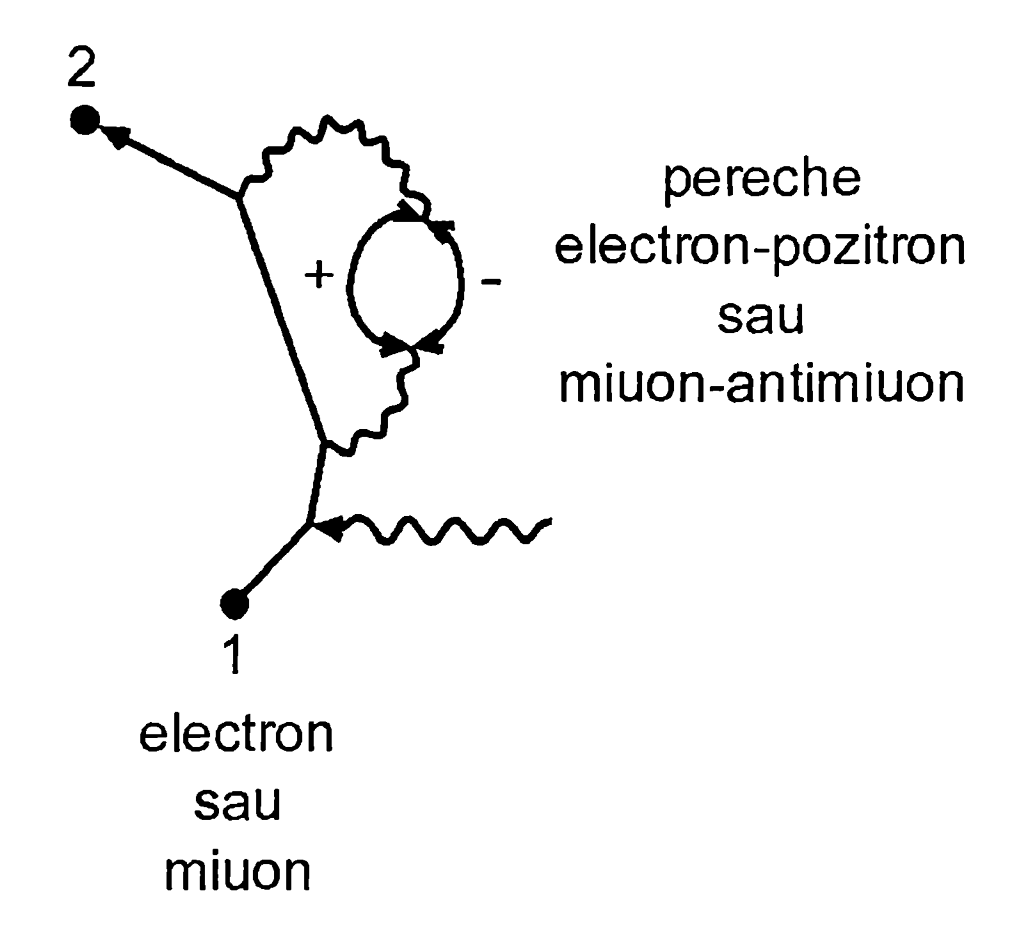


Figura 89. În procesul de bombardare a nucleelor cu protoni la energii din ce în ce mai înalte, apar noi particule. Una din aceste particule este miuonul, sau electronul greu. Teoria care descrie interacțiunile miuonului este exact aceeaşi ca pentru electron, cu excepția faptului că în E(de la A la B) se ia o valoare mai mare pentru *n*. Momentul magnetic al miuonului ar trebui să fie un pic diferit de cel al electronului, din cauza unei alternative anume: atunci când electronul emite un foton ce se dezintegrează într-o pereche electron-pozitron sau într-o pereche miuon-antimiuon, dezintegrarea dă naştere unei perechi de particule cu masă apropiată sau mult mai mare decât a electronului originar. Pe de altă parte, atunci când un *miuon* emite un foton ce se dezintegrează într-o pereche miuon-antimiuon sau într-o pereche pozitron-electron, dezintegrarea dă naştere unei perechi de particule cu masă apropiată sau *mult mai mică* decât a miuonului originar. Experimentele confirmă această mică diferență.

Din cauza faptului că miuonul are o masă de aproximativ 200 de ori mai mare decât electronul, „acul cronometrului" se roteşte pentru miuon de 200 de ori mai repede decât pentru electron. Acest lucru ne-a permis să verificăm dacă electrodinamica se mai comportă potrivit teoriei şi la distanțe de 200 de ori mai mici decât cele pe care le puteam testa anterior - asta chiar dacă distanțele respective încă sunt cu peste optzeci de cifre zecimale mai mari decât distanțele la care teoria în sine ar da de bucluc cu infiniții (a se vedea nota de subsol de la pagina 141).

Am văzut că un electron se poate cupla cu un W (a se vedea Figura 85). Atunci când un quark *d* se transformă într-un quark *u*,

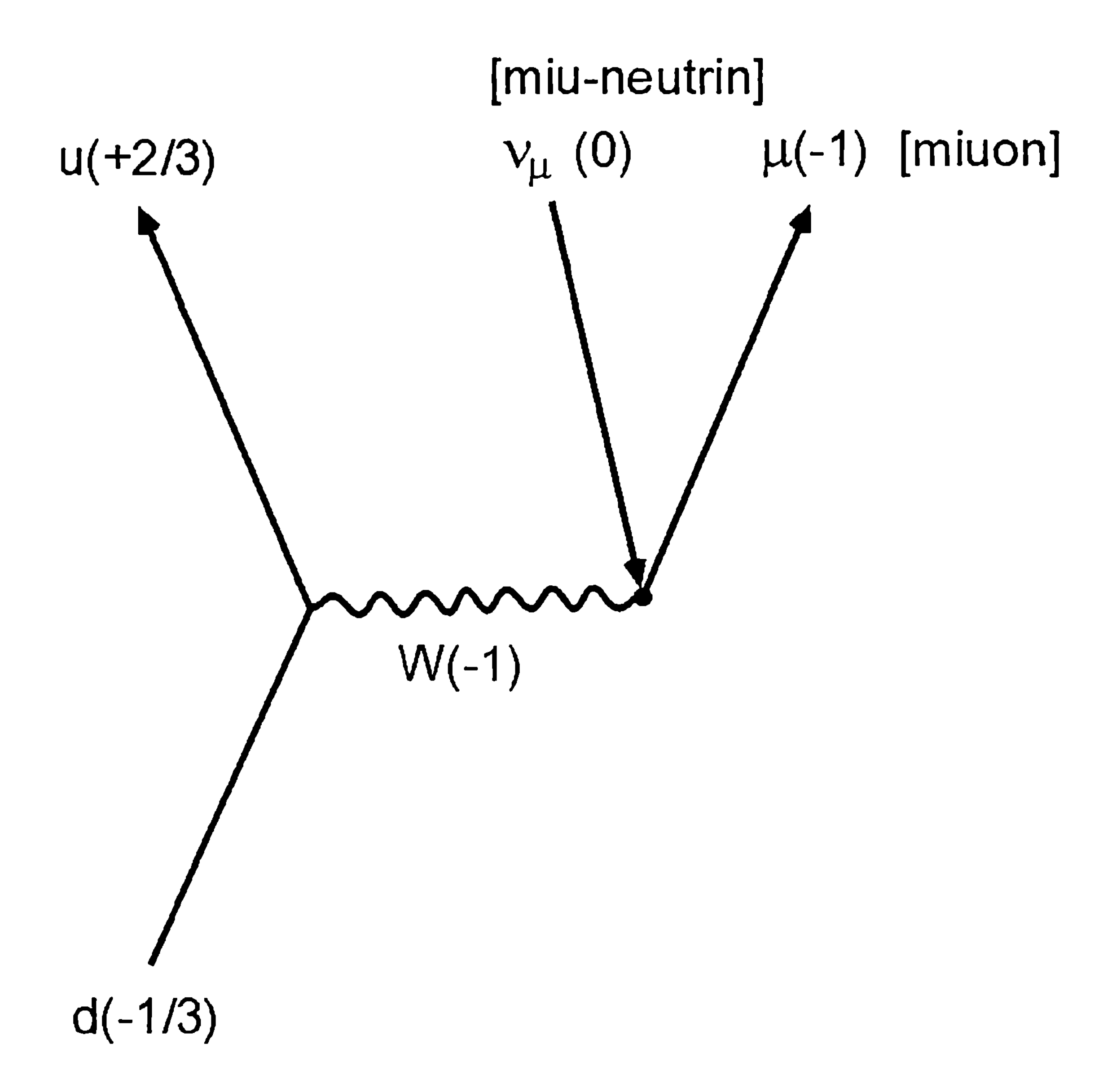


Figura 90. W-ul prezintă o anumită amplitudine de emitere a unui miuon, în locul emiterii unui electron. În acest caz, locul neutrinului obişnuit este luat de un miu-neutrin.

emițând un W, este oare posibil ca W-ul să se cupleze cu un miuon în loc de un electron? Da (a se vedea Figura 90). Şi cum rămâne atunci cu antineutrinul? În cazul cuplării W-ului cu un miuon, locul neutrinului obişnuit este luat de o particulă numită miu-neutrin. Deci tabelul nostru conține acum două noi particule, pe lângă electron şi neutrin: miuonul şi miu-neutrinul.

Şi cum rămâne cu quarkurile? Foarte de timpuriu, s-a ştiut că trebuia ca unele particule să fie alcătuite din quarkuri mai grele decât *u* sau *d*. Astfel, pe lista particulelor fundamentale a fost inclus un al treilea quark, numit *s* (de la „straniu"). Quarkul *s* are o masă de aproximativ 200 MeV, spre deosebire de 10 MeV, cât au quarkurile *u* şi *d*.

Timp de mulți ani s-a crezut că există doar trei „arome" de quarkuri - *u*, *d* şi *s* - dar, în 1974, a fost descoperită o nouă particulă, numită mezon psi, care nu putea fi alcătuită din cele trei quarkuri. De asemenea, exista şi un argument teoretic foarte puternic pentru faptul că trebuia să mai fie şi un al patrulea quark, care să se cupleze cu quarkul *s* prin intermediul unui W, în aceeaşi manieră ca *u* şi *d* (a se vedea

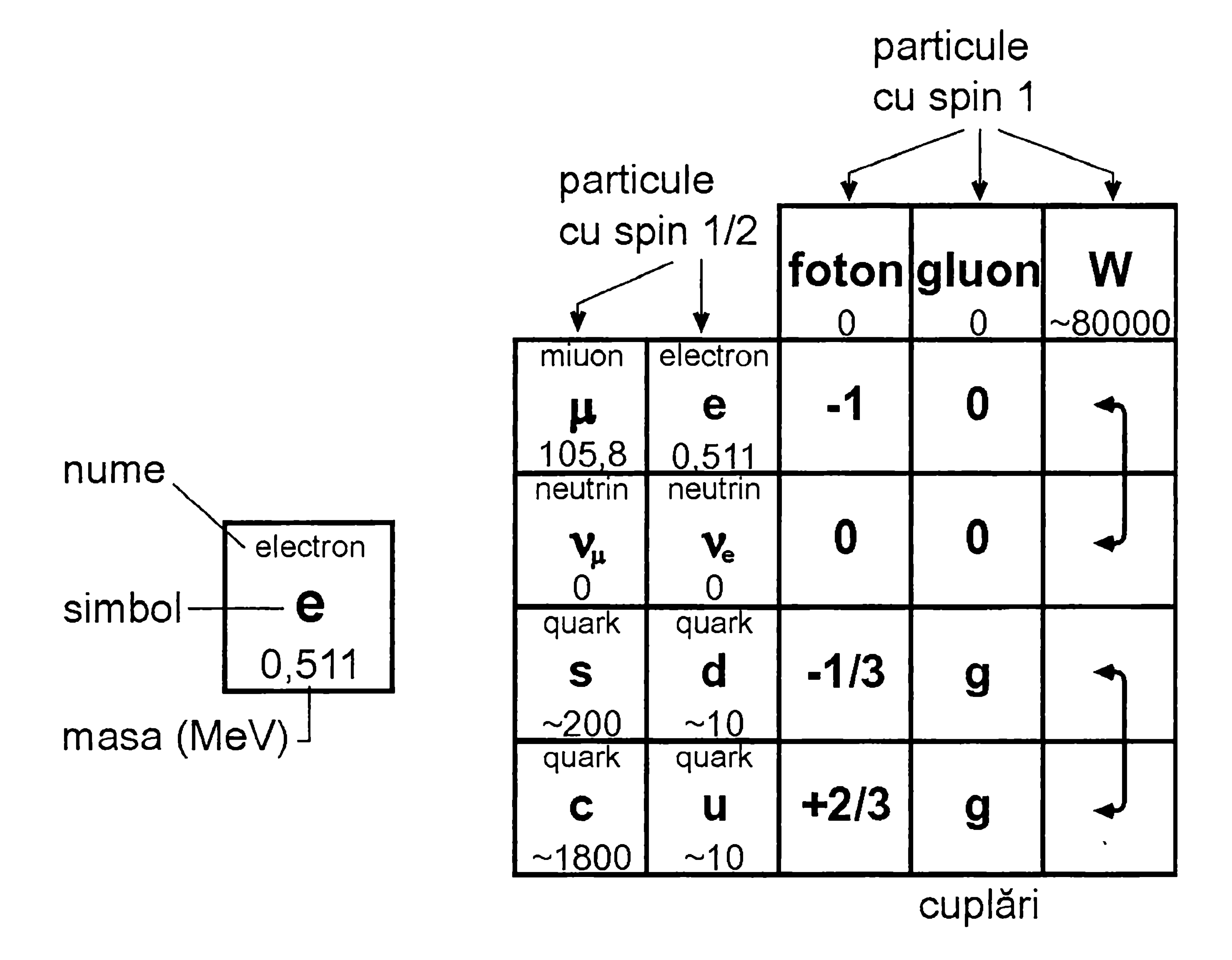


Figura 91. Natura pare să repete particulele cu spin 1/2. Pe lângă miuon şi miu-neutrin, există două noi quarkuri – *s* şi *c* – care au aceeaşi sarcină dar mase mai mari decât corespondentele lor din coloana vecină.

Figura 91). „Aroma“ acestui quark se numeşte *c*, şi nu îndrăznesc să vă spun de la ce cuvânt provine, dar probabil că veţi fi citit prin reviste [*charmed* = *vrăjit*, în engleză, în original (n.t.)]. Numele devin din ce în ce mai neinspirate!

Această repetare de particule cu aceleaşi proprietăţi dar cu mase mai mari este un complet mister. Ce-i cu această ciudată dedublare a tiparelor? Sau, cum a spus profesorul I. I. Rabi, atunci când a fost descoperit miuonul: „Cine a comandat asta?“

Recent, a început o nouă repetare a acestei liste. Pe măsură ce ne îndreptăm către energii din ce în ce mai înalte, Natura pare să tot îngrămădească astfel de particule, de parcă ar vrea să ne năucească. Sunt nevoit să vă vorbesc despre ele deoarece doresc să vedeţi cât de manifest complicată arată lumea cu adevărat. Ar fi foarte înşelător să

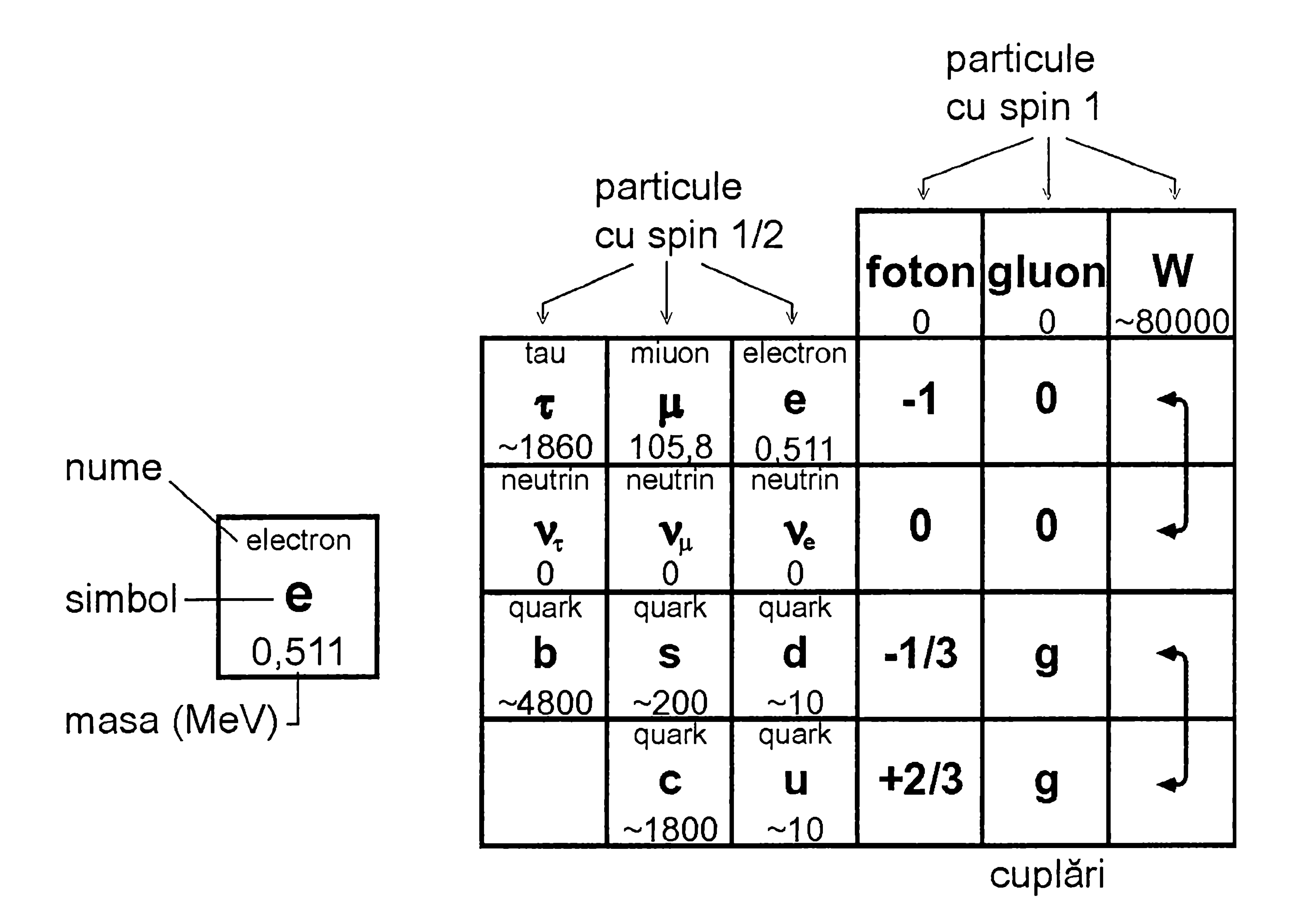


Figura 92. O luăm de la capăt! A început o nouă repetare a particulelor cu spin 1/2, la energii încă şi mai înalte. Această repetare se va încheia dacă se va descoperi vreo particulă cu proprietăţi de asemenea natură încât să implice existenţa unei noi arome de quark. Între timp, se desfăşoară pregătiri pentru căutarea începutului încă unei repetări, la energii încă şi mai înalte. Cauza acestor repetări constituie un absolut mister.

vă las impresia că dacă am rezolvat 99% din fenomenele lumii cu ajutorul electronilor şi fotonilor, restul de 1% din fenomene necesită cu 1% mai multe particule! Se dovedeşte că pentru a explica acest ultim 1%, ne trebuie de zece sau de douăzeci de ori mai multe particule suplimentare.

Deci, o luăm de la capăt: prin folosirea în experimente a unor energii încă şi mai mari, a fost descoperit un electron încă şi mai greu, numit „tau“; el are o masă de aproximativ 1800 MeV, fiind greu cât doi protoni! S-a avansat, de asemenea, şi ideea existenţei unui tau-neutrin. Iar acum s-a descoperit o particulă dubioasă, care implică existenţa unei „arome“ noi de quark - de data aceasta este vorba de „*b*“, de la

„beauty" [*frumusețe*, în limba engleză, în original (n.t.)] - şi care are sarcina -1/3 (a se vedea Figura 92). Acum aş dori să deveniți pentru o clipă fizicieni de înaltă clasă în domeniul teoriei fundamentale, şi să preziceți ceva: va fi descoperită o nouă aromă de quark, numită „__" (de la „__"), cu sarcina __ şi masa __ MeV... iar noi avem în mod cert speranța că ea există *cu adevărat*.[7]

Între timp, se efectuează experimente pentru a vedea dacă ciclul se repetă din nou. În clipa de față, se construiesc maşinării cu care să se caute un electron încă şi mai greu decât tau. Dacă masa acestei presupuse particule este de vreo 100.000 MeV, ea nu va putea fi produsă. Dacă însă este undeva în jurul a 40.000 MeV, s-ar putea ca ea să fie realizabilă.

Astfel de mistere fac foarte interesantă meseria de fizician teoretician: Natura ne confruntă cu puzzle-uri atât de minunate! De ce oare repetă Ea electronul pentru mase de 206 şi respectiv de 3640 de ori mai mari?

Pentru a încheia pe de-a-ntregul cu particulele, aş dori să mai fac o ultimă remarcă. Atunci când un quark *d* se transformă într-un quark *u*, printr-o cuplare cu un W, el prezintă de asemenea o mică amplitudine de a se transforma într-un quark *c*. Atunci când un quark *u* se transformă într-un quark *d*, el prezintă de asemenea o mică amplitudine de a se transforma într-un quark *s*, şi încă o şi mai mică amplitudine de a se transforma într-un quark *b* (a se vedea Figura 93). Prin urmare, W-ul „o dă în bară" un pic, şi permite quarkurilor să treacă dintr-o coloană a tabelului în alta. Motivul pentru care amplitudinile quarkurilor de transformare dintr-un tip în altul se află în acest raport, este absolut necunoscut.

Aşadar, acesta este tot restul fizicii cuantice. E o amestecătură cumplită, şi ați putea spune că fizica s-a băgat într-o încurcătură fără ieşire. Dar aşa a arătat ea dintotdeauna. Natura a arătat mereu ca o încurcătură cumplită, însă, pe măsură ce mergeam mai departe, observam tipare şi puneam teorii cap la cap: apărea o anumită limpezire şi lucrurile deveneau mai simple. Încurcătura pe care tocmai v-am prezentat-o este mult mai mică decât încurcătura cu care a trebuit să avem de-a face acum zece ani, când ar fi trebuit să vă spun despre mai mult de o sută de particule. Şi gândiți-vă la încurcătura de la începutul

---

[7] După susținerea acestor prelegeri, au fost descoperite unele dovezi în favoarea existenței unui quark *t*, cu masă extrem de mare - în jur de 40.000 MeV.

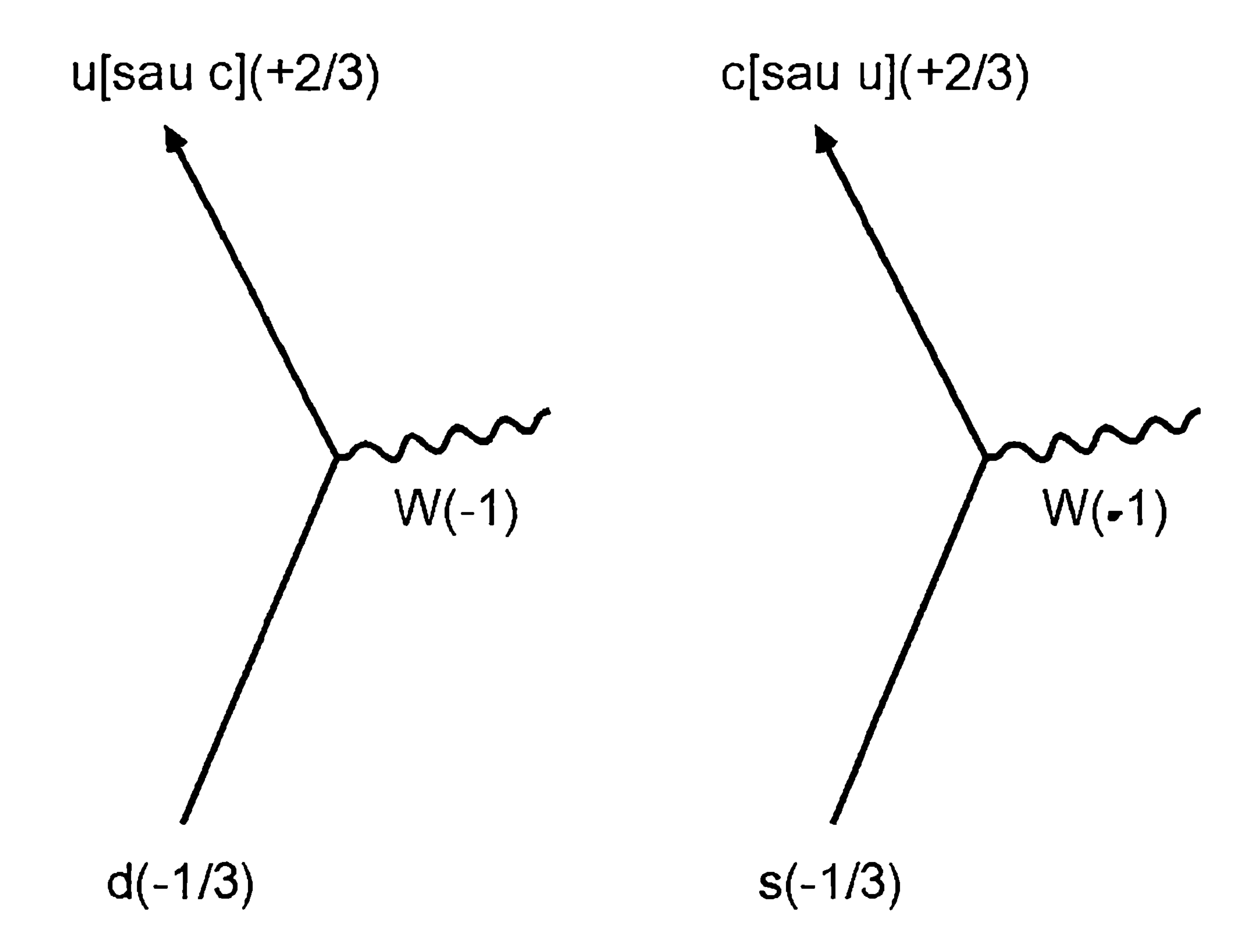


Figura 93. Un quark *d* prezintă o mică amplitudine de a se transforma într-un quark *c*, în loc de a se transforma într-un quark *u*, iar un quark *s* prezintă o mică amplitudine de a se transforma într-un quark *u*, în loc de a se transforma într-un quark *c*, în ambele situații emițându-se un W. Prin urmare, W-ul pare a avea capacitatea de a modifica aroma unui quark, dintr-o coloană a tabelului în alta (a se vedea Figura 92).

acestui secol, când existau fenomene termice, fenomene magnetice, fenomene electrice, fenomene optice, raze X, raze ultraviolete, indici de refracție, coeficienți de reflexie, şi alte proprietăți ale diferitelor substanțe, pe care de atunci le-am strâns pe toate într-o singură teorie, electrodinamica cuantică.

Aş dori să subliniez un lucru. Teoriile referitoare la restul fizicii sunt foarte asemănătoare cu teoria electrodinamicii cuantice: ele implică toate interacțiunea obiectelor cu spin 1/2 (precum electronii şi quarkurile) cu obiecte cu spin 1 (precum fotonii, gluonii, ori W-urile), în cadrul conceptual al amplitudinilor. În acest cadru, probabilitatea unui eveniment este pătratul lungimii unei săgeți. Din ce motiv toate teoriile fizicii au o structură atât de asemănătoare?

Există un număr de posibilități. Prima ar fi imaginația limitată a fizicienilor: atunci când observăm un fenomen nou, încercăm să-l încadrăm în sistemul conceptual de care dispunem deja – până ce nu vom fi făcut suficiente experimente, nu vom fi ştiind că treaba nu ține. Aşa încât, atunci când un nebun de fizician susține o prelegere la UCLA,

în anul 1983, și rostește „așa stau lucrurile, și priviți cât de minunat se aseamănă teoriile“, asta nu înseamnă că Natura este *cu adevărat* asemănătoare, ci că fizicienii nu au fost în stare decât să se gândească la același afurisit de lucru, iar și iar.

O altă posibilitate ar fi ca *într-adevăr să fie* același afurisit de lucru iar și iar – ca Natura să aibă doar o singură manieră de a face lucrurile, și să se repete din vreme în vreme.

O a treia posibilitate ar fi ca lucrurile să arate asemănător din cauză că ele constituie aspecte ale unui același lucru – ale unei viziuni mai largi aflate la bază, din care se despart chestii ce arată diferit, precum degetele de la o mână. Mulți fizicieni lucrează din greu în încercarea de a construi o viziune amplă, care să unifice totul în cadrul unui model supermeseriaș. Este un joc minunat, dar în momentul de față niciunul din cei care fac speculații nu cade de acord cu niciun altul în privința a cum arată această amplă viziune. Atunci când afirm că majoritatea acestor teorii speculative nu au cu nimic mai multă profunzime logică decât ghicitul dumneavoastră în legătură cu posibila existență a unui quark *t*, nu exagerez decât cu foarte puțin: vă garantez că fizicienii nu se pricep cu nimic mai bine ca dumneavoastră la ghicitul masei quarkului *t*!

De exemplu, se vădește că electronul, neutrinul, quarkul *d* și quarkul *u* se potrivesc toate între ele – într-adevăr, primele două se cuplează cu W-ul, la fel ca și ultimele două. Actualmente se crede că un quark își poate schimba doar „culoarea“ și „aroma“. Dar poate că un quark s-ar putea dezintegra într-un neutrin, prin cuplare cu vreo particulă nedescoperită. Drăguță idee. Ce s-ar întâmpla atunci? Ar însemna că protonii sunt instabili.

Vine cineva și avansează o idee: protonul este instabil. Se fac calcule și se găsește că în Univers n-ar mai trebui să existe protoni! Așa încât el mai sucește numerele, și introduce o valoare mai mare pentru masa noii particule. După mult efort, se face predicția că protonul se dezintegrează într-un ritm cu puțin mai lent decât cel mai recent ritm cu care s-a observat experimental că protonul nu se dezintegrează.

Atunci când se realizează un nou experiment, în care proprietățile protonului sunt măsurate cu mai multă precizie, teoriile sunt ajustate pentru a scăpa din strâmtoare. Cel mai recent experiment a arătat că protonul nu se dezintegrează nici cu un ritm de cinci ori mai lent decât cel prezis de *ultima versiune* a teoriilor. Ce credeți că s-a întâmplat? Pasărea Phoenix a renăscut, și teoria a fost modificată din nou, astfel încât să necesite experimente încă și mai precise pentru

verificarea ei. Nu se ştie dacă protonul se dezintegrează sau nu. Este foarte dificil de demonstrat că el nu se dezintegrează.

Pe parcursul tuturor acestor prelegeri, nu am discutat despre gravitaţie. Motivul este acela că influenţa gravitaţiei asupra obiectelor este *extrem de mică*: este vorba de o forţă mai slabă decât forţa electrică dintre doi electroni printr-un factor de 1 urmat de 40 de zerouri (posibil 41 de zerouri). În cadrul materiei, forţele electrice servesc aproape în întregime la menţinerea electronilor în apropierea nucleului din atomul respectiv. Se creează astfel un amestec bine echilibrat de sarcini pozitive şi negative, care se anulează reciproc. Dar în cazul gravitaţiei, singura forţă este de atracţie, şi ea continuă să sporească cu cât se adună laolaltă mai mulţi atomi. În final, atunci când se ajunge la corpuri voluminoase precum ale noastre, putem începe să măsurăm efectele gravitaţiei asupra nouă înşine, asupra planetelor, şi aşa mai departe.

Din cauza faptului că forţa gravitaţională este atât de slabă în comparaţie cu celelalte interacţiuni, la ora actuală este imposibil de realizat orice experiment care să fie atât de delicat încât să permită măsurarea vreunui efect necesitând precizia unei teorii cuantice pentru explicarea lui.[8] Chiar dacă nu există niciun mod în care să fie testate, există totuşi teorii cuantice ale gravitaţiei, care implică „gravitoni" (particule ce ar urma să figureze într-o categorie nouă de polarizare, numită „spin 2") şi alte particule fundamentale (dintre care unele cu spin 3/2). Cea mai bună dintre aceste teorii nu este în stare să includă particulele găsite, şi inventează o grămadă de particule ce nu se găsesc. Teoriile cuantice ale gravitaţiei au şi ele infiniţi în cadrul termenilor cu cuplări, însă „procedeul tembel" care funcţionează în electrodinamica cuantică pentru a scăpa de infiniţi, nu dă rezultate în cazul gravitaţiei. Deci, nu numai că nu dispunem de experimente cu care să verificăm o teorie cuantică a gravitaţiei, nu dispunem nici măcar de o teorie raţională.

* * *

[8] Atunci când Einstein şi alţii au încercat să unifice gravitaţia cu electrodinamica, ambele teorii reprezentau nişte aproximări clasice. Cu alte cuvinte, erau eronate. Niciuna din aceste teorii nu dispunea de cadrul conceptual al amplitudinilor, despre care ştim astăzi că este necesar.

Pe parcursul întregii acestei poveşti, a rămas în mod special tratată nesatisfăcător o anumită caracteristică: masele observate experimental ale particulelor, m. Nu există nicio teorie care să explice în mod adecvat aceste valori. Folosim aceste numere în cadrul tuturor teoriilor noastre, dar nu le înțelegem - ce reprezintă ele, sau de unde provin. Cred că, din punct de vedere fundamental, aceasta constituie o problemă foarte interesantă.

Îmi pare rău dacă toate aceste speculații în legătură cu noi particule v-au derutat cumva, dar am decis să îmi întregesc discuția în legătură cu restul fizicii, pentru a vă arăta modul în care *caracterul* acestor legi - cadrul conceptual al amplitudinilor, diagramele reprezentând interacțiunile ce urmează a fi calculate, şi aşa mai departe - se dovedeşte a fi acelaşi cu cel pentru teoria electrodinamicii cuantice, cel mai bun exemplu de teorie corectă.

Notă adăugată la lectura de corectură a textului, noiembrie 1984:

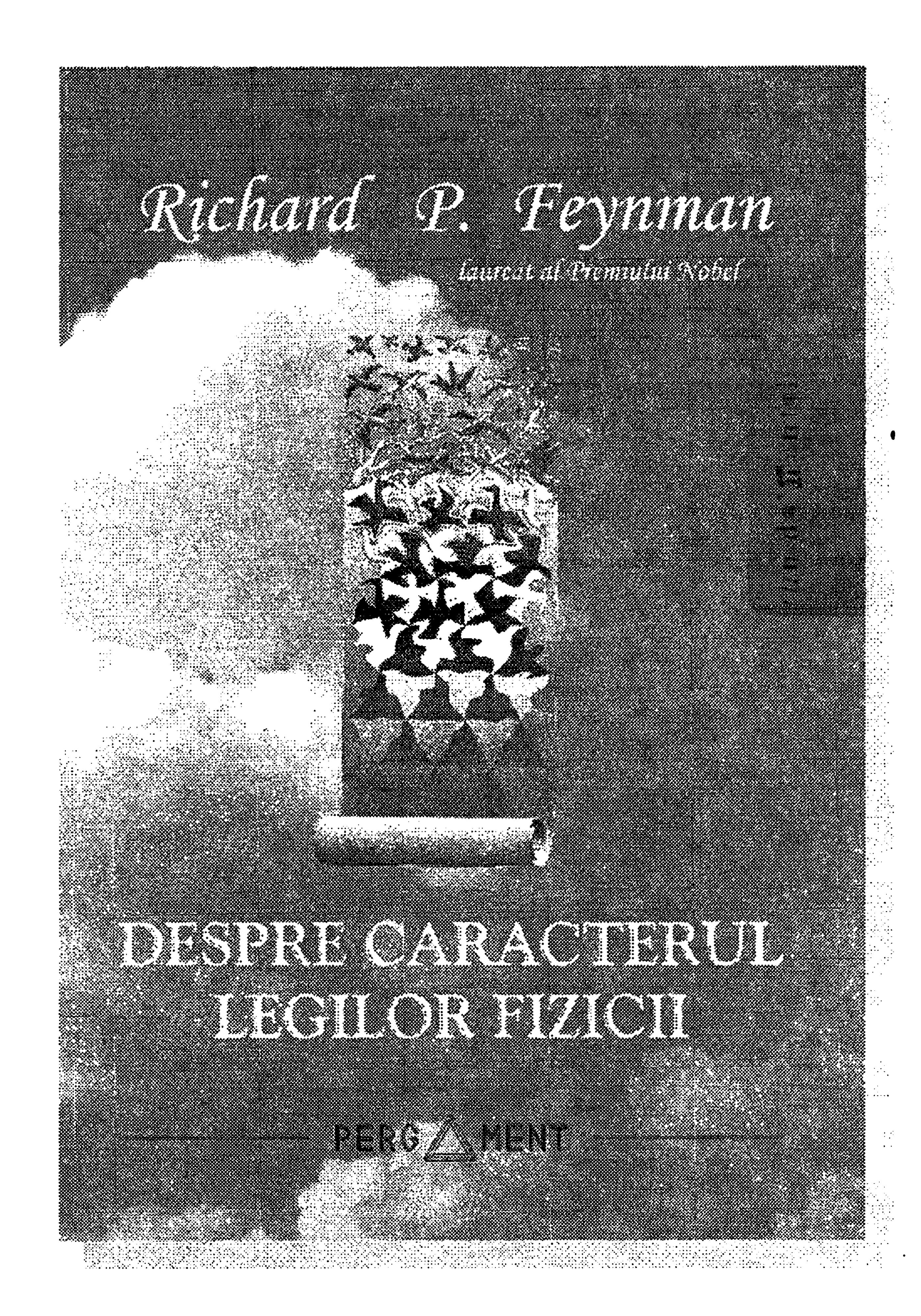
De la susținerea acestor prelegeri, evenimente suspecte observate în cadrul unor experimente, par să facă posibilă descoperirea în curând a unor alte particule sau fenomene, noi şi neaşteptate (şi, ca atare, nemenționate în aceste prelegeri).

Notă adăugată la lectura de corectură a textului, aprilie 1985:

La ora de față, „evenimentele suspecte“ menționate mai sus se dovedesc a fi o alarmă falsă. Până la vremea la care veți fi citind această carte, fără îndoială că situația se va fi modificat din nou. În fizică, lucrurile se schimbă mai rapid decât în activitatea editorială.

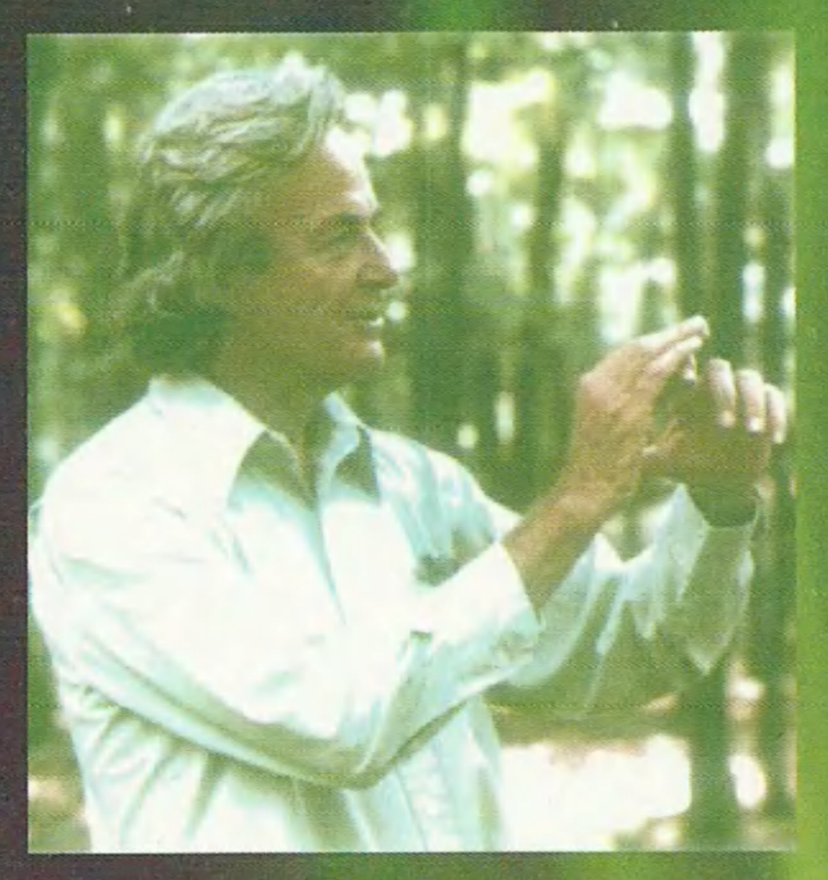
INDEX

De acelaşi autor, în cadrul colecţiei fundamental a mai apărut:



Richard P. Feynman face parte din acei foarte puţini fizicieni care, în ultimele trei-patru decenii, şi-au câstigat un loc binemeritat alături de clasici. Însă, pe deasupra, profesorul Feynman este cel care a ştiut ca nimeni altul să explice pe înţelesul tuturor cele mai abstracte şi mai subtile aspecte ale fizicii.

Să pătrundem în marea aulă a prestigioasei universităţi americane Cornell, pentru a urmări „pe viu" o serie de prelegeri nu *de*, ci *despre* fizică. Transcrierea lor reproduce cu fidelitate înregistrarea realizată cu această ocazie de televiziunea BBC, fără alte retuşuri ulterioare, tocmai din dorinţa de a păstra pe cât posibil nealterată savoarea spectacolului de la catedră.



Să urmărim o nouă serie de prelegeri susținute de profesorul Richard P. Feynman la o altă prestigioasă universitate americană, UCLA (University of California, Los Angeles). După ce în precedentul volum ne-a vorbit *Despre caracterul legilor fizicii*, marele om de știință își propune de această dată să ne prezinte în mod riguros cea mai amplă și mai de succes teorie fizică de până acum, electrodinamica cuantică (sau, pe scurt, *QED*). Cu doar două excepții (gravitația și reacțiile nucleare tari), electrodinamica cuantică explică absolut toate fenomenele fizice observate în jurul nostru și, prin extindere, pe cele chimice și biologice. Vom avea deosebita satisfacție/oroare să constatăm că până și cele mai elementare lucruri, de adevărul cărora eram convinși încă de pe băncile școlii, nu sunt decât simple aproximări ale percepției omenești: lumina nu se propagă pe vreo traiectorie anume (fie ea în linie dreaptă sau altcumva); lumina nu se propagă cu vreo viteză anume (fie ea 300.000 km/s sau altcâtva); particulele din care spunem că este alcătuită lumea, precum electronii ori fotonii, nu sunt ceea ce înțelegem îndeobște prin cuvântul *corpuri* (sau prin cuvântul *undă*, sau prin orice alt cuvânt inventat vreodată de om). Și, pentru ca spectacolul să fie complet, toate demonstrațiile sunt făcute fără a apela la ecuații matematice.





ISBN 978-973-85481-2-1
Lei 20
9 789738 548121